UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Diagnóstico del efecto de diferentes usos del suelo en el almacenamiento del carbono del piedemonte amazónico y simulación de escenarios alternativos

María del Pilar Hurtado Sánchez

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias Agropecuarias, Escuela de Posgrados
Doctorado en Ciencias Agrarias
Palmira, Colombia
2019

Diagnóstico del efecto de diferentes usos del suelo en el almacenamiento del carbono del piedemonte amazónico y simulación de escenarios alternativos

María del Pilar Hurtado Sánchez

Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:

Doctora en Ciencias Agrarias

Director:

Ph.D., Patrick Lavelle

Codirectora:

Ph.D., Elena Velásquez

Línea de Investigación:

Suelos y Aguas

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Agropecuarias, Escuela de Posgrados

Doctorado en Ciencias Agrarias

Palmira, Colombia

2019

Resumen

La conservación de los bosques existentes, es una condición necesaria para el mantenimiento del calentamiento global dentro del límite deseado de 2°C. En el Piedemonte amazónico Colombiano, la principal actividad económica es la ganadería de doble propósito, que genera ingresos por venta de leche y carne. No obstante, el impacto de altas precipitaciones sobre suelos mal cubiertos, el manejo inadecuado de las praderas con presiones altas de pastoreo y la utilización de áreas no aptas para la ganadería, entre otros crean compactación y erosión de los suelos.

El propósito de este trabajo fue establecer el impacto de la Amazonia deforestada sobre el ciclo global de C, analizando su dinámica en tres sistemas de uso del suelo derivados del bosque inicial en el Departamento de Caquetá para comparar sus impactos. Se escogieron un Sistema Convencional – derivado de un bosque talado hace 80 años (Pastos nativos, leguminosas y malezas), un Sistema Silvopastoril – derivado de un bosque talado hace 60 años (Diversidad de Forrajes) y un Sistema Agroforestal – de 20 a 30 años con cultivos de (Caucho, Copoazú y Arazá). Se determinó en cada sistema, el potencial de almacenamiento de carbono en la biomasa aérea (ecuaciones alométricas), el suelo y los agregados, la estabilidad y contenido de la materia orgánica (Isótopos Estables), con el fin de conocer el efecto en la dinámica de la materia orgánica por la alteración del bosque nativo e identificar prácticas agrícolas sostenibles que contribuyan a un mejoramiento en la calidad del suelo y en la mitigación del calentamiento global.

Las pasturas, exhibieron los menores valores promedio de almacenamiento de carbono en el suelo (0 a 30 cm) de 46,11 ton C/ha mientras en los sistemas agroforestales se encontraron niveles mayores de 52,83 ton C/ha. Por otra parte en la biomasa aérea, los niveles hallados fueron de 108.04, 48,80 y 25,77 Mg C/ha para los sistemas agroforestal, silvopastoril y convencional respectivamente. Los máximos valores se deben a sistemas que proveen materia orgánica de lenta descomposición y mayores contenidos de agregados biogénicos y de raíces.

Por otra parte, en los sistemas estudiados se observa la señal $\delta\ ^{13}C$ en el rango de -22 ‰ a -26 ‰, propia de plantas C3 ó bosques. Aunque el sistema convencional posee pasturas degradadas, su señal isotópica es proveniente del bosque que estuvo hace 80 años. Así mismo éste sistema, presenta las mayores pérdidas de nitrógeno, con valores de $\delta\ ^{15}N$ de 9,19 ‰ mientras el sistema agroforestal exhibe un nivel de $\delta^{15}N$ de 7,30 ‰.

Adicionalmente, se evaluó el potencial de la espectroscopía NIR para la predicción del C, N, ^{13}C y ^{15}N en éste suelo Oxisol del Caquetá, con el fin de generar curvas de calibración empleando el modelo matemático de PLS Modificado – SNV Detrend. Las curvas se obtuvieron usando la totalidad del espectro y arrojaron SEC y SECV de prácticamente cero, RSQ cercanos a uno y RPD de 3.32, 5.02, 3.88 y 3.24 respectivamente. Los RPD superiores a 3.0, garantizan la predicción de la concentración de las muestras desconocidas.
Finalmente, el Modelo Century confirma el potencial de los sistemas de almacenar carbono en el futuro y sus simulaciones fueron avaladas con los test estadísticos evaluados: r=0.9584, CD= 0.8185, RMSE=14.42 toneladas C/ha y M=0.0182.

Palabras claves: Dinámica de la materia orgánica, ^{13}C y ^{15}N, Ecuaciones Alométricas, Almacenamiento de carbono, NIR, Modelo Century

Abstract

The conservation of forests is a necessary condition for the maintenance of global warming within the desired limit of 2 ° C. In the Colombian Amazonian Piedemonte, the main economic activity is dual-purpose livestock, which generates income from the sale of milk and meat. However, the impact of high rainfall on poorly covered soils, inadequate management of pastures with high grazing pressures and the use of areas not suitable for livestock, among others create soil compaction and erosion.

The purpose of this work was to establish the impact of the Amazon deforested on the global cycle of C, analyzing its dynamics in three systems of land use derived from the initial forest in the Department of Caquetá to compare its impacts. A Conventional System was chosen - derived from a forest cut 80 years ago (native pastures, legumes and weeds), a Silvopastoral System - derived from a forest cut 60 years ago (Forage Diversity) and an Agroforestry System - from 20 to 30 years with crops (Caucho, Copoazú and Arazá). The carbon storage potential of the aerial biomass (allometric equations), the soil and the aggregates, the stability and content of the organic matter (Stable Isotopes) were determined in each system, in order to know the effect on the dynamics of the organic matter by the alteration of the native forest and to identify sustainable agricultural practices that contribute to an improvement in the quality of the soil and in the mitigation of global warming.

The pastures exhibited the lowest average values of carbon storage in the soil (0 to 30 cm) (46,11 ton C / ha) while in the agroforestry systems higher levels were obtained (52,83 ton C / ha). On the other hand, in aerial biomass, the levels found were 108.04, 48.80 and 25.77 Mg C / ha for the agroforestry, silvopastoral and conventional systems, respectively. The maximum values are due to systems that provide organic matter of slow decomposition and higher contents of biogenic aggregates and roots aggregates.

On the other hand, in the studied systems the signal δ ^{13}C is observed in the range of -22 ‰ to -26 ‰, typical of C3 plants or forests. Although the conventional system has degraded pastures, its isotopic signal comes from the forest planted 80 years ago. Likewise, this system has the highest nitrogen losses, with values of $\delta^{15}N$ of 9.19 ‰ while the agroforestry system exhibits a level of $\delta^{15}N$ of 7.30 ‰.

Additionally, the potential of NIR spectroscopy was evaluated for the prediction of C, N, ^{13}C and ^{15}N in this Oxisol soil of Caquetá, in order to generate calibration curves using the mathematical model of PLS Modified - SNV Detrend. The curves were obtained using the entire spectrum and the values of SEC and SECV were practically zero, RSQ close to one and RPD of 3.32, 5.02, 3.88 and 3.24 respectively. The RPD were higher than 3.0, guarantee the prediction of the concentration of the unknown samples.

Finally, the Century Model confirms the potential of carbon storage systems in the future and its simulations were supported by the statistical tests evaluated: r = 0.9584, CD = 0.8185, RMSE = 14.42 tons C / ha and M = 0.0182.

Keywords: Organic matter dynamics, ^{13}C and ^{15}N, Allometric equations, Carbon storage, NIR, Century Model

Dedicatoria

A mi hijo Juan Camilo, gran tesoro y motor de mi vida

A mi padre Benjamín, ejemplo de honestidad, valor y responsabilidad

A mi madre María Inés, símbolo de fortaleza, amor y apoyo incondicional

A mi hermana Clara Inés, un ser colmado de generosidad, bondad y solidaridad infinita.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, por la formación profesional brindada durante el estudio del doctorado.

A la Agencia Nacional de Investigación – ANR de Francia, por la financiación total de éste proyecto de investigación.

Al Doctor Patrick Lavelle, por la dirección de ésta tesis y el apoyo brindado desde la etapa de muestreos hasta la finalización del proyecto. A la Doctora Elena Velásquez de la Universidad Nacional Sede Palmira, por la codirección de ésta investigación.

A Hernán Mezú Mina y Arbey Alvarez Sánchez, por su amistad y ayuda en los extenuantes muestreos en el Departamento de Caquetá. Sin ésta fase, no se habría culminado con éxito la investigación.

A los laboratorios de Servicios Analíticos y Física de suelos del Centro Internacional de Agricultura Tropical – CIAT, por el procesamiento parcial de las muestras de suelo recolectadas.

A los Doctores Juan Carlos Menjivar (Universidad Nacional-Sede Palmira), Carlos Eduardo Cerri (Universidad de Sao Paulo, Escuela Superior de Agricultura Luiz de Queiroz) y Jesús Larrahondo (CENICAÑA), por sus valiosos aportes como jurados quienes contribuyeron a mejorar la calidad del documento.

A los Doctores Michel Grimaldi (IRD), Thierry Desjardins (IRD) y Sylvain Dolédec (Universidad de Lyon) por compartir los conocimientos en sus diferentes disciplinas, ayudándome en mi crecimiento profesional.

A las Doctoras Mariela Rivera, Yolanda Rubiano y Carmen Alicia Parrado por la amistad y fortaleza que me brindaron durante todo el proceso del doctorado.

A mis grandes amigos, John Eiver Belalcázar (CIAT), Doris Builes (BAXTER) y Nubia Rodríguez (AGROSAVIA La Libertad) por no dejarme rendir en los momentos difíciles y con su presencia hacer del camino de la vida un mágico viaje.

A todos y cada una de las personas que con su cariño sincero, confiaron siempre en mí.

Contenido

Pág.

Resumen ..... **III**

Abstract ..... **V**

Lista de figuras ..... **XI**

Lista de tablas ..... **XIII**

Introducción **1**

1. OBJETIVOS **5**
1.1 Objetivo general 5
1.2 Objetivos específicos 5

2. HIPÓTESIS **6**

3. Efecto del uso del suelo en el potencial del almacenamiento de carbono en el suelo y en la biomasa aérea **7**
3.1 Almacenamiento de carbono en la biomasa y en los suelos de los sistemas de uso de la Amazonía 7
3.2 Agregación del suelo y del almacenamiento de carbono 8
3.2.1 Variables ambientales 8
3.2.2 Agentes inorgánicos 9
3.2.3 Fauna del suelo 9
3.2.4 Raíces 9
3.2.5 Microorganismos 10
3.3 Materiales y Métodos 10
3.3.1 Localización del estudio 10
3.3.2 Diseño Experimental 11
3.4 Unidades experimentales, variables a medir e información complementaria 14
3.5 Análisis estadístico de la información 14
3.6 Almacenamiento de carbono en el suelo 15
3.6.1 Muestreo y determinación de Carbono 15
3.6.2 Preparación de la muestra 16
3.6.3 Análisis de la muestra 18
3.7 Predicción de las propiedades químicas del suelo por espectroscopía de infrarrojo - NIR 18
3.7.1 Preparación de la muestra 18

3.7.2 Análisis de la muestra 18
3.7.3 Curva de calibración 19
3.7.4 Cuantificación de las muestras 20
3.7.5 Curvas de calibración NIR 20
3.7.6 Segunda derivada de las señales espectrales 23
3.8 Determinación de almacenamiento de carbono en la biomasa aérea por medio de ecuaciones alométricas 27
3.9 Discusión de resultados 28
3.9.1 Propiedades químicas del suelo 28
3.9.2 Propiedades físicas del suelo 29
3.9.3 Morfología del suelo 30
3.9.4 Resultados obtenidos en la agregación del suelo 31
3.9.5 Almacenamiento de carbono en el suelo 32
3.9.6 Almacenamiento de carbono en la biomasa aérea 34

4. Dinámica de la materia orgánica en diferentes usos de suelo 39
4.1 Fauna del suelo, raíces y macroagregación 41
4.2 ^{13}C de la materia orgánica como integrador de los cambios en la vegetación 43
4.3 Origen de la materia orgánica en el suelo y procesos de transformación y pérdida de nitrógeno 45

5. Modelización de la dinámica de la materia orgánica 53
5.1 CANDY (Carbon- Nitrogen-Dynamics) 53
5.2 CENTURY 54
5.3 DAISY 54
5.4 DNDC (Denitrificación and Descomposición) 54
5.5 NCSOIL 55
5.6 ROTHC 55
5.7 SOMM 55
5.8 ITE (Institute of Terrestrial Ecology – Edinburgh) 56
5.9 VERBERNE 56
5.10 Modelo century en el estudio de la dinámica de la materia orgánica en los usos de suelo de estudio 56
5.11 Calibración de la simulación de los datos de carbono, en diferentes usos de suelos del Piedemonte Amazónico Colombiano 60
5.12 Simulación de escenarios, en diferentes usos de suelos del Piedemonte Amazónico Colombiano 71
5.12.1 Escenarios de métodos de siembra en el Sistema Tradicional 72
5.12.2 Escenarios de pastoreo en los sistemas de uso de estudio 74
5.12.3 Escenarios de implementación de plantaciones y cultivos en el sistema convencional 76
5.12.4 Escenarios de adición de fertilizantes en el sistema convencional 77

6. Conclusiones y recomendaciones 78

Bibliografía 79

Lista de figuras

Pág.

Figura 2-1. Localización de los sitios de estudio…… ..9

Figura 2-2: Composición del paisaje en los 6 sitios donde se realizó el proyecto AMAZ

Figura 2-3. Sistemas de Uso de Muestreo……..10

Figura 2-4. Sistemas Convencional……..10

Figura 2-5. Sistemas Silvopastoril……...……...10

Figura 2-6. Sistemas Agroforestal…….11

Figura 2-7. Calicata……12

Figura 2-8. Molino de balines pistón…….13

Figura 2-9. Manera de empacar las muestras de suelo……14

Figura 2-10. ACP y Circulo de correlación para los parámetros de pH, acidez intercambiable y bases……16

Figura 2-11: ACP y Circulo de correlación para los variables físicas del suelo……17

Figura 2-12: Espectro NIRS de una muestra de suelo entre 1108 y 2498 nm……...35

Figura 2-13: Curva de calibración con el NIR……36

Figura 2-14: Espectro NIR de una muestra de suelo…….37

Figura 2-15: Curva de calibración NIR para carbono total…….38

Figura 2-16: Curva de calibración NIR para $\delta^{13}C$…….....38

Figura 2-17: Curva de calibración NIR para $\delta^{15}N$……...39

Figura 2-18: Curva de calibración NIR para Nitrógeno total…….39

Figura 2-9: Circulo de correlación de la segunda derivada de las longitudes de onda más características de un espectro de suelo……..40

Figura 2-20: Abundancia de grupos OH de acuerdo al sistema de uso del suelo…….41

Figura 2-21: Abundancia de grupos C=O de acuerdo al sistema de uso del suelo.....42

Figura 2-22: Abundancia de grupos C-H de acuerdo al sistema de uso del suelo……...43

Figura 2-23: Niveles de almacenamiento de carbono en los sistemas de uso de suelo en estudio……18

Figura 2-24: ACP y Circulo de correlación para los parámetros de almacenamiento de cabono y contenido de nitrógeno en las tres profundidades……..19

Figura 2-25: Almacenamiento de carbono en biomasa aérea, en diferentes sistemas de uso de suelo……20

Figura 2-26: Almacenamiento de carbono en suelo y biomasa aérea, en diferentes sistemas de uso de suelo……21

Figura 2-27: Almacenamiento de carbono en suelo y biomasa aérea, en las 27 fincas de los 3 sistemas de estudio……...22

Figura 3-1: Izquierda: modelo general de autoorganización en suelos que integra organismos, ecosistemas y paisajes y las estructuras creadas a cada escala; Derecha:

Interacciones y mecanismos que sostienen la liberación de servicios ecosistémicos a escala del paisaje (Lavelle et al., 2006)…….26

Figura 3-2: Diagrama de flujo para la dinámica del carbono en ecosistemas terrestres mostrando los cinco principales compartimientos……24

Figura 3-3: Efectos Causados por las lombrices en la materia orgánica del suelo a diferentes niveles de una escala temporal y una espacial…….25

Figura 3-4: Variación de la señal isotópica de las plantas C_3 y C_4……...27

Figura 3-5: Monolito de suelo (0 a 10 cm)……29

Figura 3-6: ACP y Circulo de correlación para los diferentes tipos de agregados encontrados en el suelo……..30

Figura 3-7: Evolución de la señal $\delta^{13}C$, en el carbono orgánico del suelo hasta una profundidad de 30 cm para los tres sistemas en estudio……31

Figura 3-8: Procesos de transformación y pérdida de nitrógeno……..32

Figura 3-9: ACP y Circulo de correlación para las señales isotópicas de ^{13} C y ^{15}N en los tres sistemas de uso…….33

Figura 3-10: Origen y distribución de la materia orgánica en los agregados del suelo de los tres sistemas de uso……...34

Figura 4-1. Reservorios y flujos de carbón en el modelo CENTURY. El diagrama muestra los principales factores que controlan los flujos……..53

Figura 4-2. Modelo de producción vegetal en CENTURY……54

Lista de tablas

Pág.

Tabla 2-1: Cantidad de suelo que se debe pesar en la cápsula de estaño……...14

Introducción

Los bosques son los ecosistemas terrestres más extensos, ocupando el 30% de la superficie emergida del planeta (FAO, 2007). A ésta importancia espacial, se añade su enorme valor en términos de biodiversidad, asociada especialmente a los bosques tropicales. Los ecosistemas forestales, se estima albergan al menos el 75% de las especies continentales y una parte importante de la biomasa terrestre (Groombridge, 1992; Heywood y Watson, 1995). Por su extensión y el carácter maduro o en estadíos sucesionales avanzados de la mayor parte de los bosques, estos desempeñan funciones ambientales de gran importancia a distintas escalas, desde la local a la global. Los bosques son hábitat y fuente de subsistencia de cientos de millones de personas, especialmente en los países menos desarrollados (Pimentel et al., 1997; Byron y Arnold, 1999;) y contribuyen al almacenamiento de carbono (Melillo et al. 1993; Dixon et al. 1994; Field et al. 1998). Se estima que la conservación de los bosques existentes es una condición necesaria para el mantenimiento del calentamiento global dentro del límite deseado de 2°C (Richardson et al., 2009).

No obstante, con el calentamiento global se han producido cambios en los regímenes de agua que pueden afectar el almacenamiento de carbono en bosques (Malhi and Wright 2004, Andreae et al, 2004; Goulden et al 2004; Kruijt et al.,2004; Larionova et al, 2010) y existe incertidumbre si el CO_2 atmosférico seguirá incrementando como consecuencia del cambio climático (Cox et al. 2000; Tan et al. 2000, Schimel et al. 2001). Por todo lo anterior, es necesario entender como el ciclo del C de los bosques y de los sistemas derivados de su transformación antrópica responde al rápido cambio en el clima y la composición atmosférica (Gash et al, 2004).

Es importante tener en cuenta que la biomasa continental (principalmente la madera de los árboles), contiene 640 giga toneladas de carbono (GtC), es decir un poco menos que el carbono almacenado en la atmósfera en forma de CO_2 (760 GtC). La materia orgánica de los suelos (2.500 GtC), contiene tres veces más C que la atmósfera. Mientras se adicionan cada año a la atmósfera 6.4 GtC por efecto de las emisiones de las industrias, 0.6 GtC se adicionan a causa de las plantas, los animales, el uso del suelo y la agricultura que emiten más (121.6 GtC) por sus actividades respiratorias que la cantidad que almacenan en forma de biomasa y materia organica del suelo. Al contrario, el océano que almacena 1020 GtC de las cuales absorbe cada año 2 GtC, como diferencia neta entre emisiones de 90 GtC y 92 GtC que ingresan de nuevo al océano. Esa diferencia de 2 GtC al año hace que el océano sea un sitio de amortiguación del cambio climático a diferencia de los sistemas terrestres.

En las últimas tres décadas, grandes extensiones de bosques han sido convertidas en pasturas y por degradación estos últimos han sido abandonados. Se ha determinado que las pasturas degradadas emiten 100 millones de toneladas de CO_2 por año (Steinfald et al, FAO 2006).

Las emisiones de CO_2 varían dependiendo de la fisiología del cultivo y del manejo (Sakai et al, 2004). Se ha establecido que cambios en el uso del suelo para las regiones tropicales en el mundo producen emisiones netas de 0,96 a 2,4 GtC/año, por diferencia entre absorción por fotosíntesis y liberación por respiración y mineralización. Por su parte, en zonas de América se emite aproximadamente 0,62 Gt C/año (extrapolaciones efectuadas con modelos NEE/NPP que no tienen en cuenta la variabilidad ambiental de la región) (Pierre et al, 2005).

En el Piedemonte amazónico Colombiano, la principal actividad económica es la ganadería de doble propósito, que genera ingresos por venta de leche y carne. Sin embargo, ésta producción ha ido disminuyendo debido al constante deterioro

de las pasturas, causado por una acelerada degradación de los suelos, la cual se presenta de manera silenciosa y solo apreciable por la disminución de la productividad y erosión de los suelos. El impacto de altas precipitaciones sobre suelos mal cubiertos, el manejo inadecuado de las praderas con presiones altas de pastoreo y la utilización de áreas no aptas para la ganadería, entre otros crean compactación y erosión de los suelos (Chauvel et al., 1999).

Entre los atributos que determinan los flujos de C de los suelos, la agregación, es importante ya que determina las condiciones de humedad (infiltración, retención de agua) y la protección física del carbono (Elliott and Coleman, 1988; Denef et al., 2001; Blanco-Canqui and Lal, 2004; Lavelle et al., 2006). No obstante, por la degradación del suelo, se origina la destrucción de los agregados, debido a la desprotección a que se ve sometido el suelo por el cambio de cobertura o el pisoteo de los sistemas de ganadería. La disminución de la actividad biológica, particularmente de las lombrices de tierra es también responsable de esta pérdida de calidad física (Velásquez, 2004). Muchos autores sostienen que la estabilidad de agregados es la propiedad física más importante, ya que de ella depende la resistencia de los suelos a la erosión y el almacenamiento de C en formas estables (Castillo y Amézquita, 2000; Jimenez and Lal, 2006).

Es importante obtener información acerca del potencial de secuestrar carbono en el suelo de los bosques y sistemas silvopastoriles, en paisajes dominados por la ganadería (Ibrahim et al, 2007; Sharrow et al, 2007), ya que existe incertidumbre de los flujos de carbono en la Amazonía debido a su variabilidad climática, a las velocidades de cambio de bosque por diferentes usos del suelo y a la complejidad del ecosistema, (Pierre et al, 2005).Entre los sistemas de conversión del bosque, existen grandes diferencias en el impacto sobre el ciclo del C.

Los sistemas agroforestales se han identificado como una alternativa tecnológica y productiva con capacidad de mejorar las condiciones ambientales y el nivel de vida de los productores del campo, debido a que se da un uso eficaz del laboreo,

mejora la circulación de nutrientes en el suelo, aprovecha mejor los recursos (agua, luz, oxígeno, mano de obra) y diversifica la producción, (IPCC, 2007; Nair et al, 2009; Saha et al, 2010).

Es por eso que instituciones como CORPOICA apoyadas con recursos del Programa Nacional de Transferencia Tecnológica Agropecuaria PRONATTA, han empezado a promover en Colombia el uso de técnicas agroforestales, para alcanzar una mayor sostenibilidad de los sistemas de producción ganaderos (Cipaguata et al, 2001). La contribución de los sistemas agroforestales, está basada en las funciones biofísicas y socioeconómicas que pueden cumplir con las interacciones positivas entre el suelo, los árboles, los cultivos y los animales, tales como la protección y enriquecimiento del suelo, estimuló a la abundancia de organismos en el suelo, diversidad de especies vegetales y sus productos, mejor productividad de la pradera y condiciones ambientales para el ganado, menores riesgos económicos al productor, empleo de mano de obra familiar y mantenimiento de las costumbres tradicionales.

El propósito de este trabajo fue contribuir al conocimiento del impacto de la Amazonia deforestada sobre el ciclo global de C, analizando la dinámica del carbono en tres sistemas de uso del suelo derivados del bosque inicial en el Departamento de Caquetá para comparar sus impactos. Se escogieron un Sistema Convencional – derivado de un bosque talado hace 80 años (Pastos nativos, leguminosas y malezas), un Sistema Silvopastoril – derivado de un bosque talado hace 60 años (Diversidad de Forrajes) y un Sistema Agroforestal – de 20 a 30 años con cultivos de (Caucho, Copoazú y Arazá). Se buscó determinar en cada sistema, el potencial de almacenamiento de carbono en la biomasa aérea, el suelo y los agregados, la estabilidad y contenido de la materia orgánica, con el fin de emplear el modelo CENTURY para predecir el efecto en la dinámica de la materia orgánica por la alteración del bosque nativo y lograr identificar prácticas agrícolas sostenibles que contribuyan a un mejoramiento en la calidad del suelo y en la mitigación del calentamiento global.

1. OBJETIVOS

1.1 Objetivo general

Evaluar el efecto de tres diferentes estrategias de uso del suelo (Sistema ganadero Convencional, Sistema Agroforestal y Sistema ganadero Silvopastoril), en el almacenamiento y en la dinámica del carbono del Piedemonte Amazónico Colombiano.

1.2 Objetivos específicos

- Evaluar el potencial del almacenamiento de carbono y su distribución en el suelo y en la biomasa aérea realizada en los sistemas de uso en estudio

- Determinar de acuerdo al origen del agregado del suelo (físicos, biogénicos, de raíces y suelo sin agregar), su porcentaje y grado de estabilidad del carbono en las zonas de estudio

- Modelizar los cambios de materia orgánica en el suelo, después de la conversión de un sistema de bosque nativo a los sistemas Convencional, Silvopastoril y Agroforestal respectivamente.

2. HIPÓTESIS

H1: El almacenamiento de carbono en la biomasa y en el suelo de diferentes sistemas de uso, aumenta cuando existe vegetación arbórea que produce materia orgánica de lenta descomposición.

H2: La estabilidad y el contenido de materia orgánica de los agregados del suelo, varían con el proceso de agregación que los originó (variables ambientales, fauna del suelo, ó raíces).

H3: La magnitud del impacto del ciclo del carbono y del nitrógeno originado por la trasformación del bosque inicial, puede ser prevista a través del modelo Century para llegar a establecer estrategias de manejo y lograr sistemas realmente sostenibles.

3. Efecto del uso del suelo en el potencial del almacenamiento de carbono en el suelo y en la biomasa aérea

La Amazonía, con sus 6 millones de km^2, es el bosque tropical más grande del mundo y alberga aproximadamente 86 Pg C, excluyendo el carbono en el suelo (Saatchi et al., 2007). La mayoría de este carbono está almacenado en la biomasa viva, ya que la necromasa contribuye aproximadamente 9.6 Pg C (Chao et al., 2009). El carbono en el suelo es un componente importante del almacenamiento de carbono total y puede contribuir aproximadamente al 50-70 % del carbono almacenado en los otros componentes del bosque (Malhi et al., 2009).

No obstante, su deforestación y cambio a otros sistemas de uso del suelo originan pérdida de carbono de la biomasa y el suelo (Koutika et al, 1997; Silver et al, 2000 y Tian et al, 2000; Desjardins et al., 2004; Foley et al, 2007;).

Es importante resaltar, que mientras el trabajo físico del suelo lo expone a la mineralización y pérdida de carbono, algunos autores sostienen que los pastizales que tienen raíces profundas (Nepstad et al 1991; Nepstad et al 1994; Fisher et al 1994), pueden almacenar más carbono en el suelo que en el bosque.

3.1 Almacenamiento de carbono en la biomasa y en los suelos de los sistemas de uso de la Amazonía

El carbono orgánico del suelo (COS) tiene un efecto importante en la agregación de las partículas del suelo (Follett y Stewart, 1985), existiendo una relación entre el tamaño promedio de los agregados y el contenido de COS. Mientras mayor es el contenido de COS lábil, mayor es el tamaño de los agregados (Buyanovsky et al., 1994). A su vez, los agregados de menor tamaño están asociados a la fracción altamente humificada con período de residencia en el suelo mayor a siete años, esto se encontró en un estudio en un cultivo de maíz al sur del estado de Aragua y norte de Guárico, Venezuela (Buyanovsky et al., 1994). Rothon (2000), encontró una correlación positiva entre el grado de estabilidad de los agregados y el contenido de materia orgánica del suelo. Similares resultados fueron obtenidos por Chaney y Swift (1984) en 26 suelos británicos y Caravaca et al. (2001) en dos suelos semiáridos de España.

3.2 Agregación del suelo y del almacenamiento de carbono

La agregación es un importante atributo del suelo que determina importantes propiedades de este, como la estructura, infiltración, retención de agua y almacenamiento de carbono. La macrofauna del suelo, especialmente los ingenieros del ecosistema (lombrices, termitas y hormigas, principalmente) se asocian fuertemente a la formación de la estructura del suelo y son determinantes importantes de los procesos del suelo que influyen en el ciclo de nutrientes, en la formación de agregados y en la permeabilidad del suelo (Velásquez et al, 2007).

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

Los agregados del suelo, son unidades estructurales dentro del suelo que controlan la dinámica de la materia orgánica y el ciclaje de nutrientes (Lavelle, P & Spain, 2001; Six et al, 2004; Bossuyt et al, 2005; Semenov et al, 2010;). Este proceso de agregación está controlado por cinco factores (Six, et al 2004):

3.2.1 Variables ambientales

Los suelos son expuestos a continuos procesos de humedad y sequedad a través del viento, la lluvia y la nieve. Investigadores, han observado que los agregados son más resistentes en periodos húmedos después de prolongados periodos secos debido a la mayor cantidad de sustancias orgánicas remanentes y por consiguiente la posibilidad de un mayor número de asociaciones entre partículas orgánicas y minerales (Haynes et al, 1990). Por otra parte, se han encontrado resultados contrastantes entre el fuego y la agregación, se ha encontrado que mientras el calor induce la formación de macroagregados durante el fuego, el carbono de los macroagregados se pierde por combustión debilitando los mecanismos de estabilización de agregados biológicos (Garcia-Oliva et al 1999; Arocena et al 2003).

3.2.2 Agentes inorgánicos

El efecto de los óxidos sobre la agregación y estabilización de materia orgánica ha sido enfatizada en muchos estudios (Imhoff et al 2002; Six et al 2002b), debido a que pueden ocurrir tres tipos de enlaces (adsorción de materiales orgánicos sobre superficies de óxidos, enlaces electrostáticos entre óxidos cargados positivamente y minerales arcillosos cargados negativamente. Así mimo, puede ocurrir que una capa de óxidos sobre la superficie de minerales forma enlaces entre partículas primarias y secundarias). Por otro lado, un elemento crítico para la estabilización de la materia orgánica y agregados es el calcio, debido a su papel en la formación de complejos de materia orgánica con cationes polivalentes y arcilla (Clough and Skjemstad, 2000), ya que estimula la actividad microbiana en suelos ácidos (Chan et al, 1999).

3.2.3 Fauna del suelo

Como ingenieros del ecosistema, las lombrices de tierra mediante la elaboración de galerías y la formación de excretas (Brown et al, 2000), contribuyen significativamente en la formación y estabilidad de agregados del suelo y en el ciclo de nutrientes (Hedde et al 2005; Jouquet et al 2006, 2007b; Fonte, et al 2007;Velásquez et al 2007), debido a la remoción de restos vegetales y otros materiales orgánicos de la superficie del suelo y su incorporación dentro de los agregados del suelo (Martin, 1991).

3.2.4 Raíces

Angers et al (1998), encontraron que el proceso relacionado a raíces afecta la estructura del suelo debido a la penetración de las raíces (decrece la proporción de macroagregados no estables pero incrementa la proporción de microagregados estables relativamente), cambio en el régimen de agua del suelo (suelos que permanecen más tiempo húmedos presentan menos agregación que los más secos), exudación de raíces, descomposición de raíces muertas (promueven la agregación) y estructura de raíces (los hongos y las raíces promueven la agregación). Rilling et al (2002b), concluyeron acerca del efecto positivo de las raíces en la agregación asociado a la excreción de la glomalina, la cual es una proteína del suelo. Se mostró también que las raíces cooperan con las lombrices en la formación de macro agregados: en un experimento de re agregación de un suelo tamizado a 2 mm e inoculado con plantas y lombrices. Las señales NIRS de los agregados formados mostraron claramente una construcción de estas estructuras (Zangerlé et al., in press). Hay evidencia que las raíces crecen más en los turriculos de las lombrices y añaden sus procesos agregativos a los de las lombrices, construyendo edificios muy estables.

3.2.5 Microorganismos

La actividad microbiana contribuye a la formación, estabilización y eventual degradación de los agregados. Investigaciones en el tema han establecido que la correlación de la agregación con la biomasa microbiana o productos microbianos, está relacionada con la influencia de hongos versus bacterias, la textura y mineralogía del suelo (Bossuyt et al, 2005, 2006; Giertz et al 2005; Pulleman et al, 2005; Jouquet et al 2007).

Se debe resaltar que la agregación, es uno de los parámetros que favorece el almacenamiento de carbono en los suelos, ya que es un parámetro del suelo sensible a los cambios en la macrofauna que se generan por el tipo de uso del suelo, pues modifican la estructura del suelo permitiendo una alta actividad biológica, lo cual indica probablemente una alta calidad en los procesos del suelo y una óptima regulación biológica en el funcionamiento de este, (Lavelle et al, 1989; Barros et al 1996; Vohland et al, 1999; Barros et al, 2001; Barros et al 2002; Barros et al, 2003; Laossi, 2008). Así mismo, las raíces juegan un papel importante ya que son las principales productoras de macroagregados (Mathieu et al, 2004; Mathieu et al, 2005; Velásquez et al, 2007; Mathieu et al, 2009;).

3.3 Materiales y Métodos

3.3.1 Localización del estudio

El estudio se efectuó en el departamento del Caquetá, el cual está ubicado en el suroriente de Colombia y al noroeste de la región amazónica entre los 00º42’17’’ de latitud sur y 02º04’13" de latitud norte y los 74º18’39’’ y 79º19’35’’ de longitud oeste, representando el 7.79% del territorio colombiano. Tiene una superficie de 88.965 km² la cual comienza en el piedemonte andino y termina en los escarpes de Araracuara, en plena selva amazónica. Grandes ríos bañan el territorio, todos afluentes del río Caquetá, que le sirve de límite por el sur. Entre estos ríos destacan el Apaporis, el Yarí, el Caguán y el Orteguaza, navegables por embarcaciones menores. A excepción de las poblaciones que se hallan situadas en las bases de la cordillera, y unos pocos caseríos indígenas en las márgenes de los grandes ríos, el resto del territorio se halla prácticamente deshabitado y cubierto de espesa selva tropical húmeda, con una temperatura que oscila entre 27º y 29º C.

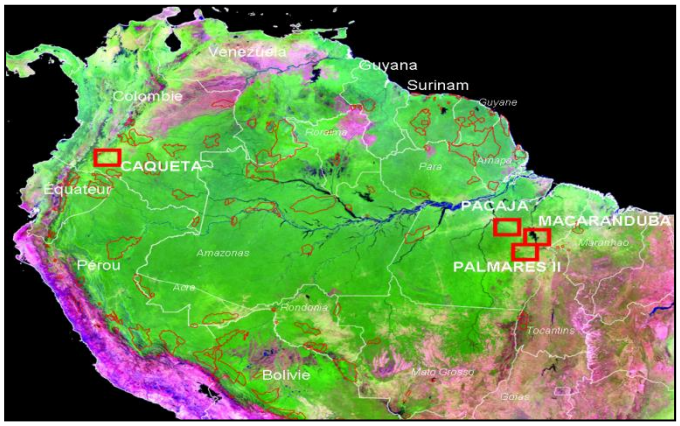
Económicamente, el territorio es rico en maderas, resinas, plantas medicinales y gomas. Los suelos, especialmente los que lindan con la cordillera, son fértiles, y se aprovechan

con cultivos de arroz, plátano, yuca, cacao y caña de azúcar. Aunque en el piedemonte existen yacimientos de estaño y carbón, la principal actividad del departamento es la ganadera con cerca de millón y medio de cabezas de ganado convirtiéndola en la cuarta población ganadera del país.

3.3.2 Diseño Experimental

El estudio hizo parte del Proyecto AMAZ del CIAT, el cual fue financiado en su totalidad por el gobierno francés (ANR) para ejecutar en la Amazonía de Brasil y en el Piedemonte Amazónico Colombiano Figura 2-1.

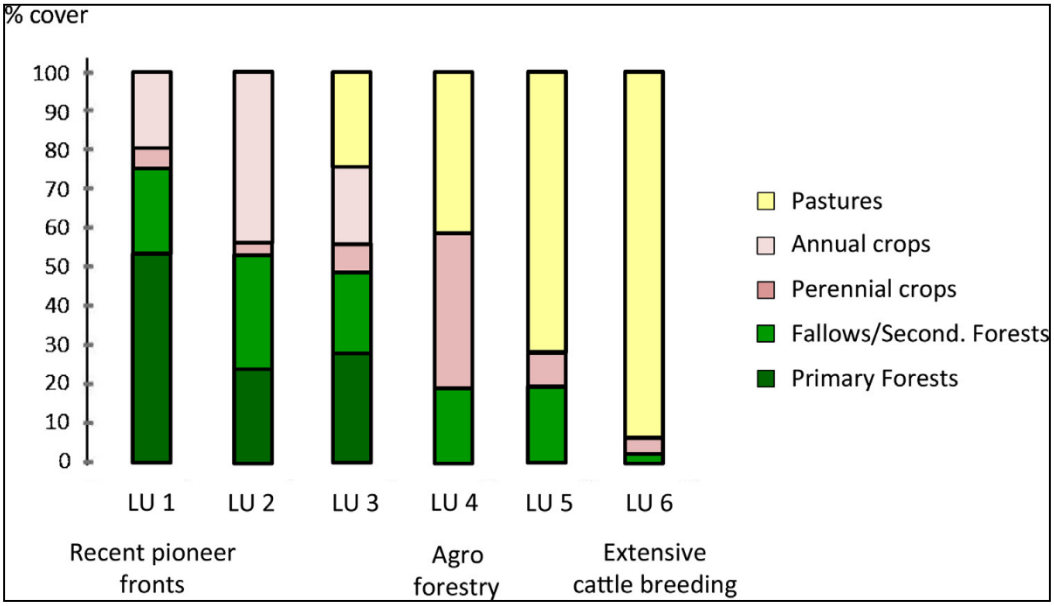
Figura 2-1: Localización de los sitios de estudio



Se seleccionaron 6 sitios en un rango de cronosecuencia de áreas deforestadas recientemente en Brasil en el Estado de Pará (aproximadamente 10 años) y otras deforestadas hace mucho tiempo en Colombia en el departamento de Caquetá (60-80 años). El conjunto inicial fue de 306 fincas (51 por sitio) y poco a poco fue reducido porque los propietarios de las fincas no permitían la investigación, la información existente era incompleta o errónea, existía abandono de la finca o no dedicaban tiempo representativo a las actividades de la finca. Con la información obtenida se realizó una clasificación de sistemas de fincas, basada en los aspectos socioeconómicos (Arnauld de Sartre et al, 2011).

Al final un subconjunto de 54 fincas (9 por sitio) fue analizado para métricas de paisaje, servicios ecosistémicos y biodiversidad (Lavelle et al, 2016). Los sitios seleccionados representan distintos estados de colonización, de 13 a 30 años en Brasil (LU1 a LU3) a 58-68 años en Colombia (LU4 a LU6), donde la proporción de bosque remanente y cobertura total de árboles decreció regularmente: 75% (LU1), 52% (LU2), 48% (LU3), 19% (LU4), 18% (LU5) y 2% (LU6), ver Figura 2-2.

Figura 2-2: Composición del paisaje en los 6 sitios donde se realizó el proyecto AMAZ



En ésta tesis de doctorado solo se trabajó en Colombia, en el departamento del Caquetá y se evaluaron 3 sistemas de uso contrastantes en ésta zona:

- **Sistema Convencional de 80 años (Balcanes):** Tamaño promedio de las fincas de 65 ha, 4% del bosque original y el 72% de su cobertura vegetal era pastura, (Grimaldi, et al 2014). También, se caracteriza por ganadería extensiva de doble propósito, monocultivo de gramíneas, un animal o menos por hectárea y sin suplementación alimenticia, (Figura 2-4).
- **Sistema Silvopastoril de 60 años (Canelos):** Fincas de 184 ha de tamaño, 66% de pasturas y 3% del bosque nativo (Grimaldi, et al 2014). Así mismo, ganadería de doble propósito, suplementación con forraje de alta calidad, gramínea en pastoreo, bancos de proteína y más de un animal por hectárea (Figura 2-5).
- **Sistema Agroforestal 20 - 30 años (Aguadulce):** 39% de pasturas, 2% del bosque inicial y fincas de 49 ha en promedio (Grimaldi, et al 2014). Es importante resaltar, la práctica de ganadería de doble propósito, suplementación con forraje de alta calidad, gramínea en pastoreo, bancos de proteína, producción agroforestal de caucho con frutales amazónicos y más de un animal por hectárea (Figura 2-6).

Cada sistema de uso estuvo conformado con 9 fincas para un total de 27 fincas de muestreo, (Figura 2-3).

Figura 2-3: Sistemas de Uso de Muestreo

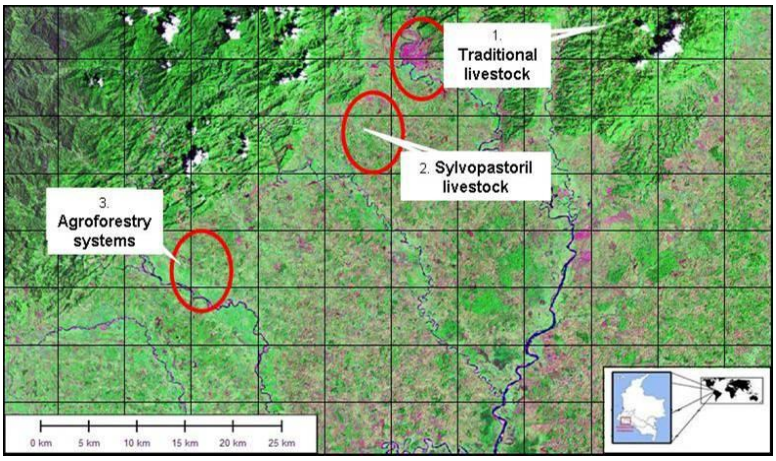


Figura 2-4: Sistemas Convencional

Figura 2-5: Sistemas Silvopastoril

Figura 2-6: Sistemas Agroforestal

3.4 Unidades experimentales, variables a medir e información complementaria

En cada una de las fincas se muestrearon 5 puntos en un transepto de 1 Km y en cada punto se tuvieron 4 repeticiones para un total de 540 puntos de muestreo. Las variables evaluadas en el suelo fueron las siguientes:

- Porcentaje de carbono, porcentaje de nitrógeno, P, Al, Ca, Mg, K, pH, ^{13}C, ^{15}N, mediciones con el torcómetro y el penetrómetro, densidad aparente, densidad real, textura, porosidad total y humedad
- Porcentajes de carbono y ^{13}C en los agregados físicos, biogénicos, de raíces y suelo sin agregar
- Diámetro a la altura del pecho (DAP) y altura total de la planta (ALT), a todos los árboles (transepto de 500 m^2) y arbustos (transepto de 250 m^2), en cada uno de los puntos de muestreo
- Almacenamiento de carbono en el suelo y en la biomasa aérea.

3.5 Análisis estadístico de la información

Se realizaron análisis descriptivos y análisis multivariados (análisis de componentes principales y de agrupación), mediante la utilización de los programas (SAS Institute, 2000) y el software R versión 2.6.2 (2008) bajo la librería ADE4.

3.6 Almacenamiento de carbono en el suelo

3.6.1 Muestreo y determinación de Carbono

Las muestras de suelo se tomaron en las 27 fincas, haciendo 4 calicatas en cada una de ellas a varias profundidades (0-10, 10-20 y 20-30 cm), para un total de 540 calicatas (Figura 2-7). Con las muestras tomadas de 0 a 10 cm de profundidad, se hicieron análisis químicos para P, Al, Ca, Mg, K, pH y en las 3 profundidades se analizaron los parámetros químicos (% C, % N, ^{13}C y ^{15}N) y los físicos:

- **Propiedades mecánicas:** textura, distribución de agregados secos al aire y distribución de agregados estables en agua

- **Propiedades volumétricas:** Densidad aparente (0 a 2 cm, 2 a 5 cm, 5 a 10 cm, 10 a 15 cm, 15 a 20 cm, 20 a 25 cm y 25 a 30 cm), densidad real, porosidad total, porosidad de aireación, permeabilidad al aire y susceptibilidad a la compactación

- **Propiedades hidráulicas:** humedad volumétrica a saturación, humedad volumétrica a capacidad de campo, humedad volumétrica a punto de marchitez permanente y agua aprovechable para las plantas

- **Propiedad de conducción de humedad:** Conductividad hidráulica saturada determinada en el laboratorio

Figura 2-7: Calicata

3.6.2 Preparación de la muestra

Las 1620 muestras de suelo se secaron al aire y luego su tamaño fue reducido adecuadamente en un molino de balines diseñado en el CIAT (Figura 2-8), para que el suelo quedara con un tamaño de partícula de 105 µm de una manera homogénea (Rondon y Thomas, 1994). Las muestras fueron pesadas en cápsulas de estaño de 8 x 5 mm (Elemental Microanálisis limited), utilizando para tal fin una microbalanza CAHN en la escala de 200 mg a 1 µg y siguiendo las recomendaciones del laboratorio de la Universidad de California, Tabla 2-1.

Figura 2-8: Molino de balines pistón

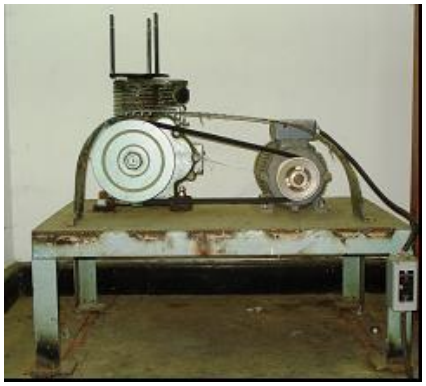


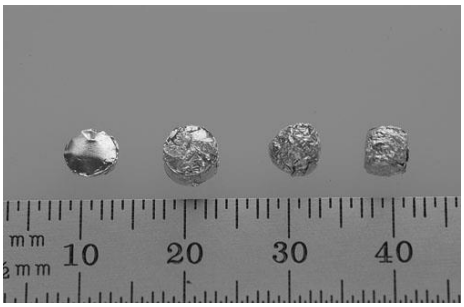
Tabla 2-1: Cantidad de suelo que se debe pesar en la cápsula de estaño

Porcentaje de materia orgánica estimado en la muestra (%)	Peso de suelo (mg)
> 29 - 25	2
> 24 – 18	3
> 17 – 14	4
> 13 – 11	5
> 10	6
> 9	7
> 8	8
> 7	9
> 6	10
> 5	12
> 4	15
> 3	30

Fuente: Tomada del Laboratorio de la Universidad UC Davis en California

Cada una de las muestras fueron encapsuladas (Figura 2-9), siguiendo las normas del laboratorio de la Universidad de California para que se pueda efectuar el análisis químico.

Figura 2-9. Manera de empacar las muestras de suelo



3.6.3 Análisis de la muestra

Las muestras en EEUU, fueron analizadas en un espectrómetro de masas con analizador de isótopos estables (Europa Integra) por el método de combustión seca (Meersmans, J. et al 2009). La temperatura de combustión fue de 1000 grados centígrados y el ciclo de análisis fue de 500 segundos. Por lo anterior, el análisis es destructivo, ya que las muestras de suelo son pasadas a estado gaseoso para poder ionizar la muestra y en estado gaseoso es llevada al detector del equipo por medio de helio como gas de arrastre o fase móvil. De esta manera, se establecieron simultáneamente los niveles de carbono total, nitrógeno total, ^{13}C y N^{15} en cada una de las muestras de suelo.

3.7 Predicción de las propiedades químicas del suelo por espectroscopía de infrarrojo - NIR

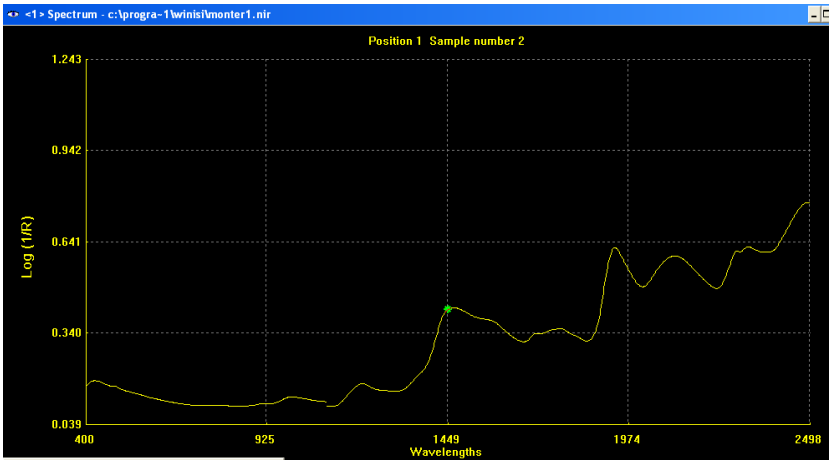
3.7.1 Preparación de la muestra

Las muestras de suelo fueron secadas al aire y luego su tamaño fue reducido adecuadamente en un molino de balines diseñado en el CIAT, para que el suelo quede con un tamaño de partícula de 105 µm de una manera homogénea (Rondon y Thomas, 1994).

3.7.2 Análisis de la muestra

Los análisis se efectuaron en un equipo de infrarrojo cercano FOSS NIR SYSTEM 6500, equipado con una lámpara halógena de tungsteno. Antes de la medición, al equipo se le realizaron 3 calibraciones previas para asegurar el correcto funcionamiento del mismo. Posteriormente, las muestras se colocaron en la celda del NIR y por medio de la lámpara, se logró obtener el espectro de cada muestra de suelo como se muestra en la Figura 2-10.

Figura 2-10: Espectro NIRS de una muestra de suelo entre 1108 y 2498 nm

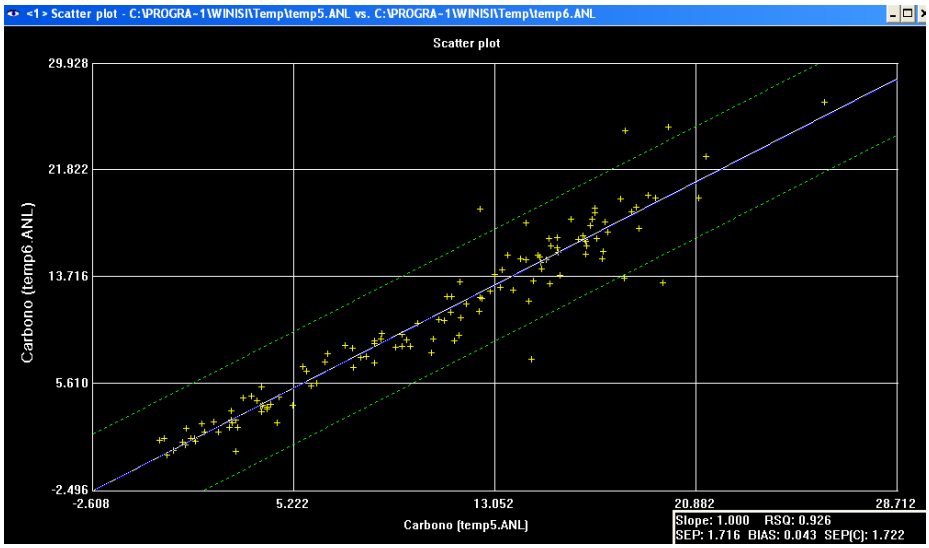


3.7.3 Curva de calibración

La curva de calibración (figura 2-11), se construyó con el espectro de cada muestra y su respectivo valor obtenido en el laboratorio por el método químico tradicional. Posteriormente, cada espectro se derivó una vez para quitar el ruido de fondo que se puede producir durante el análisis y después de evaluar varios tratamientos matemáticos, se utilizó para todas las calibraciones el tratamiento matemático PLS modificado debido a los resultados de los test estadísticos que se realizaron con su aplicación (RSQ, SEC, SECV, 1-VR y RPD). Para aceptar una curva de calibración, se deben obtener RPD mayores a 3, valores cercanos a 1 para 1-VR y RSQ mientras se requieren SEC y SECV próximos a cero.

Se efectuó una curva de calibración por parámetro a determinar. El software que se utilizó fue el WINISI versión1.5 de Infrasoft International, LLC.

Figura 2-11: Curva de calibración con el NIR



3.7.4 Cuantificación de las muestras

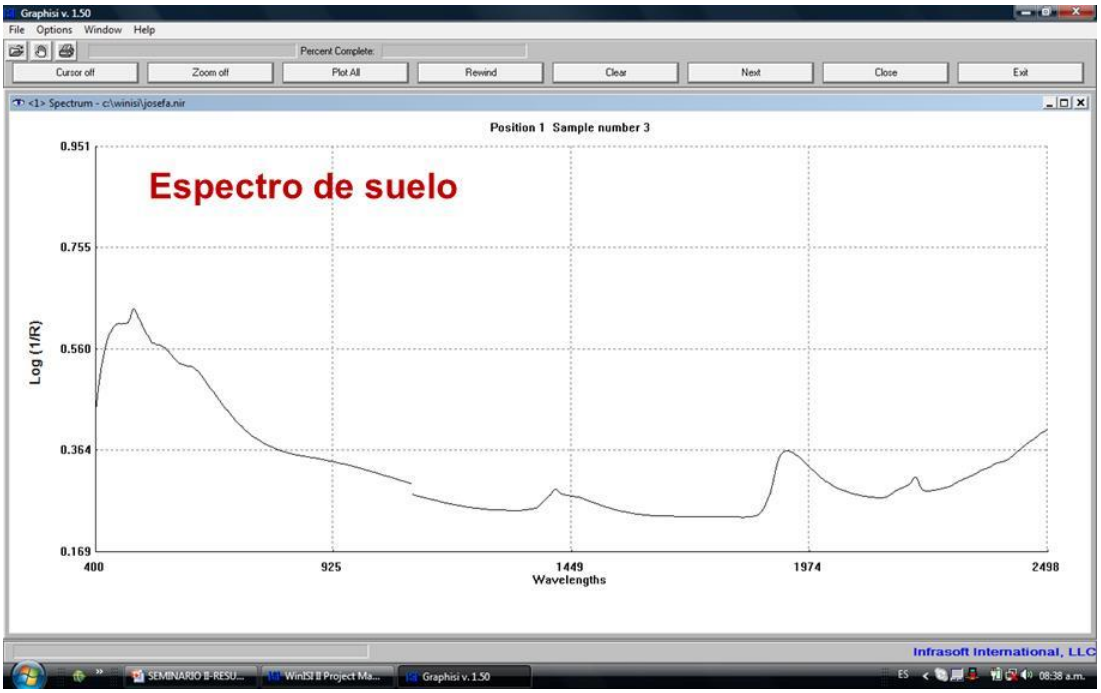
Con los espectros de las muestras y la curva de calibración obtenida, se predijo el % de carbono, % de nitrógeno, ^{13}C y N^{15} de las muestras analizadas. Esto permitió la reducción de costos y tiempo por concepto de análisis de laboratorio.

En ésta técnica se debe asegurar que exista un tamaño homogéneo en las muestras, para que los cambios observados sean el resultado de la variable química que se está midiendo y no de aspectos físicos de la muestra. Así mismo, es indispensable que el método primario empleado para la construcción de la curva de calibración sea confiable con un error de laboratorio muy bajo.

3.7.5 Curvas de calibración NIR

Después de obtener las imágenes espectrales de las muestras de suelo (Figura 2-12), se efectuaron las curvas de calibración para % C, % N, ^{13}C, ^{15}N, K, P, Al, Ca, Mg, Mn y Na, empleando el Programa WINISI versión 1.5 y aplicando el modelo matemático:2,5,5,4, con la matemática PLS modificado y SNV Detrend. Para la curva de calibración de % N, se empleó el modelo matemático: 2,4,4,1 – PLS Modificado – SNV Detrend.

Figura 2-12: Espectro NIR de una muestra de suelo



En el caso de curvas de calibración de NIR, se debe lograr valores de RSQ cercanos a uno y de SEC o SECV de prácticamente cero. Además, no se deben obtener valores de RPD inferiores a 3.0 para poder efectuar la predicción de la concentración de las muestras desconocidas. En el caso del nitrógeno, carbono, $\delta^{13}C$ y $\delta^{15}N$ se obtuvieron valores de 3.32, 5.02, 3.88 y 3.24 respectivamente (Figuras 2-13, 2-14, 2-15 y 2-16).

Figura 2-13: Curva de calibración NIR para carbono total

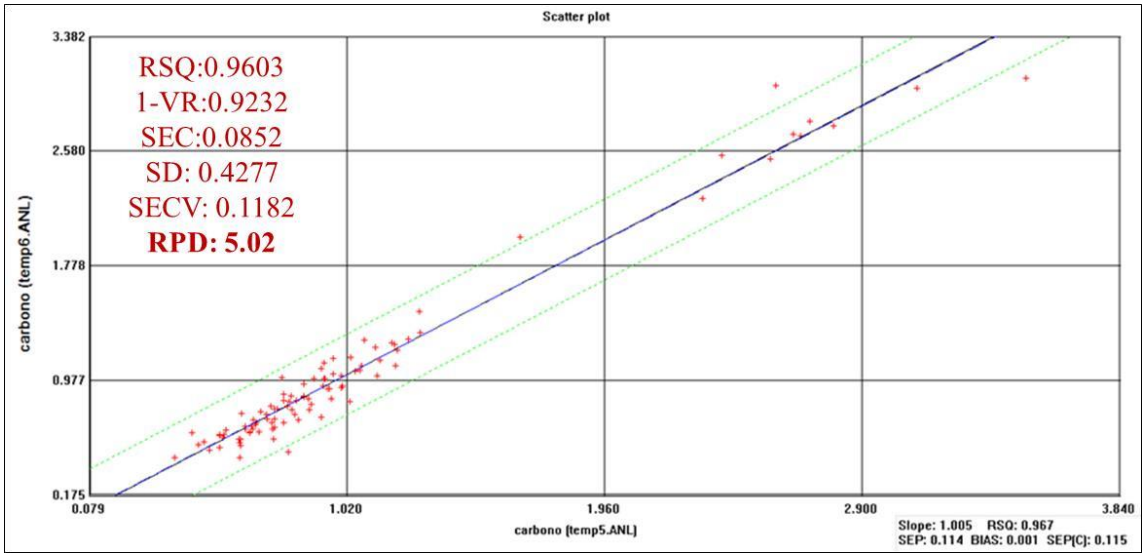


Figura 2-14: Curva de calibración NIR para $\delta^{13}C$

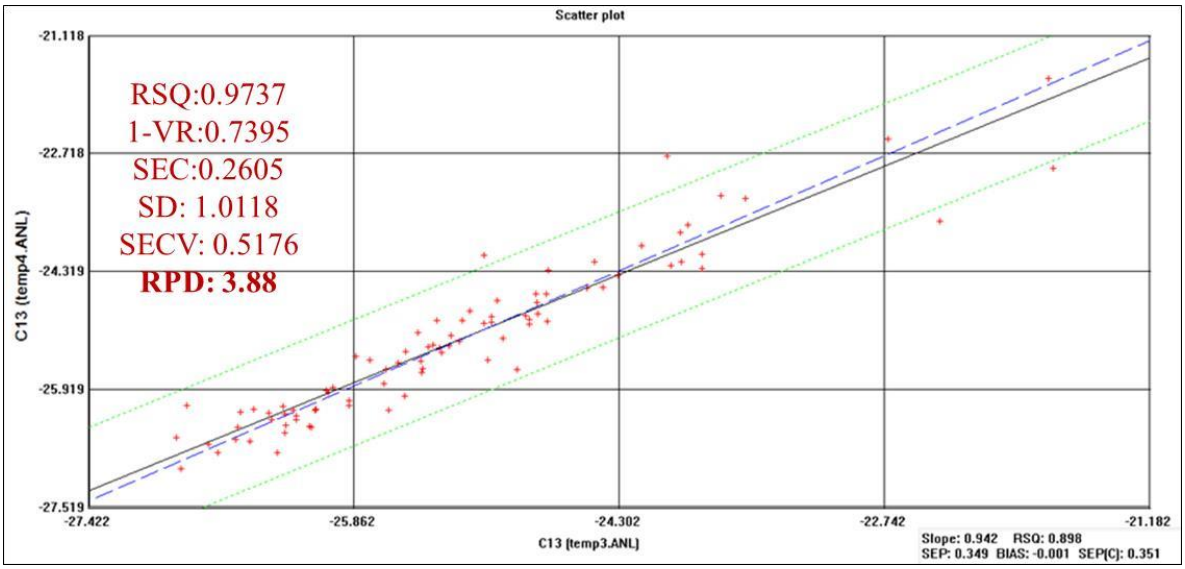


Figura 2-15: Curva de calibración NIR para $\delta^{15}N$

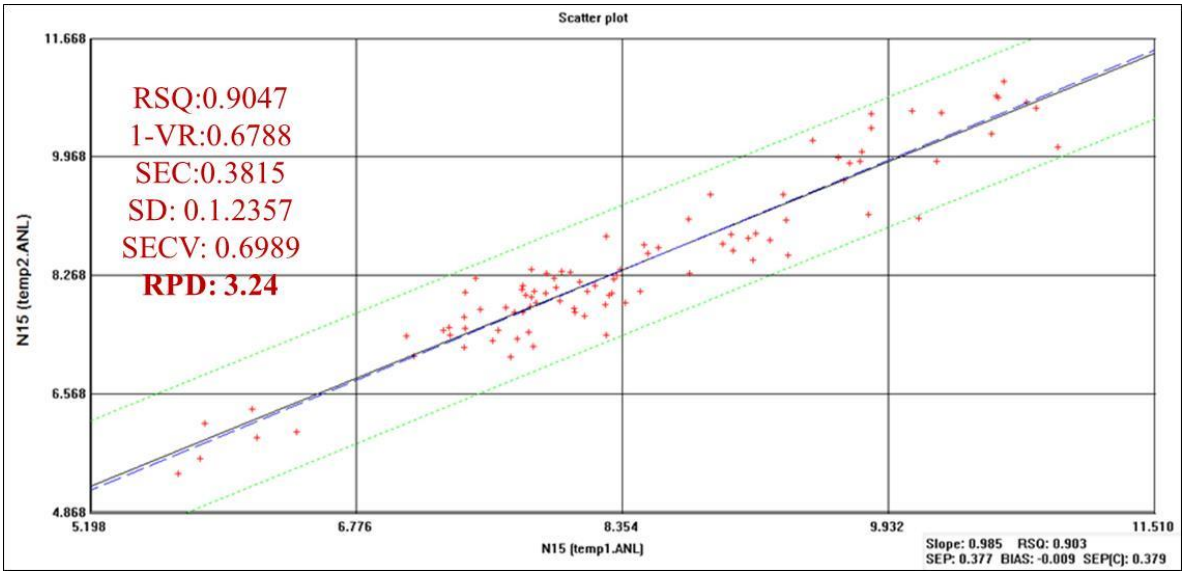
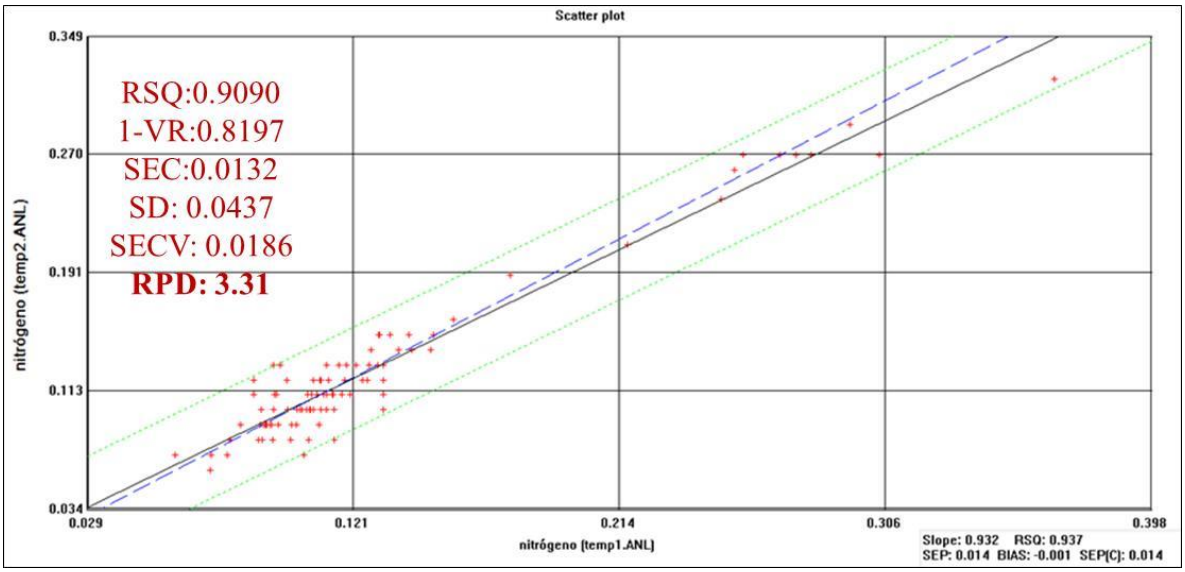


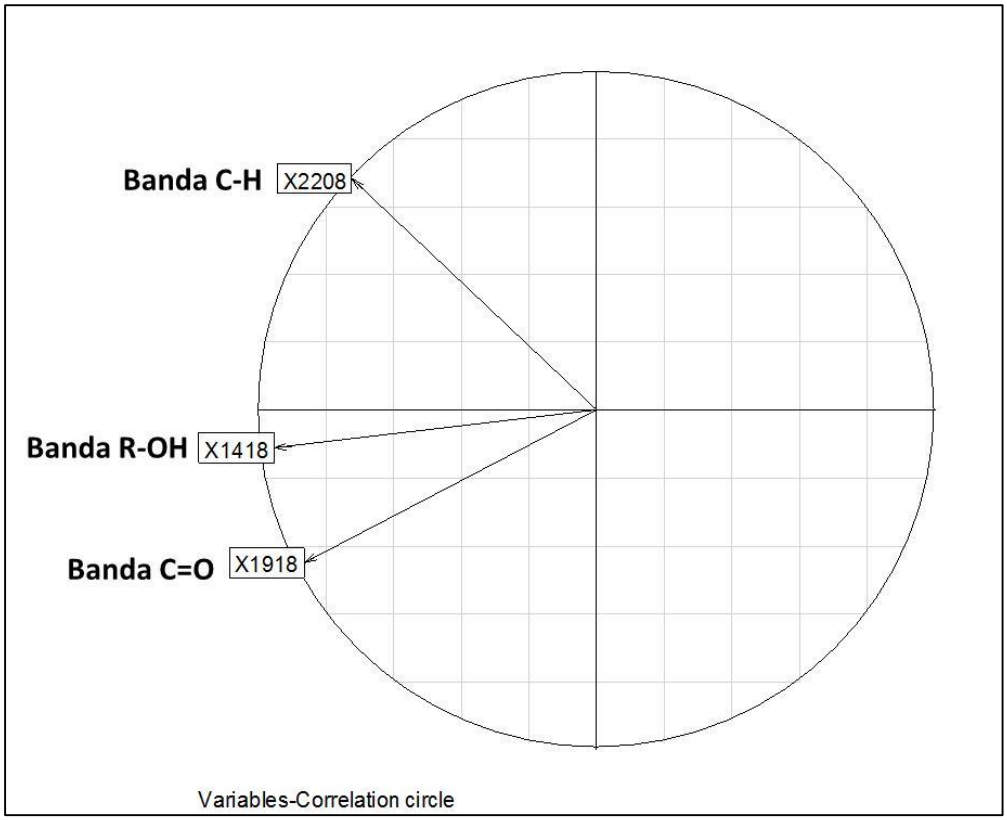
Figura 2-16: Curva de calibración NIR para Nitrógeno total



3.7.6 Segunda derivada de las señales espectrales

Adicionalmente, se efectuó la segunda derivada de todos los espectros de suelo y se efectuó el círculo de correlación con las 3 longitudes de onda más sobresalientes en un espectro de suelo: 1418 nm, 1918 nm y 2208 nm (Figura 2-17).

Figura 2-17: Circulo de correlación de la segunda derivada de las longitudes de onda más características de un espectro de suelo



Finalmente en los 3 sistemas de uso de suelo, se estableció la abundancia de los grupos C-H (Figura 3-9), R-OH (Figura 3-10) y C=O (Figura 3-11), de acuerdo a la composición de los elementos del paisaje establecidos en el campo y vinculados con la firma espectral registrada con Landsat TM en el 2007, (Oszwald et al., 2011).

Figura 2-18: Abundancia de grupos OH de acuerdo al sistema de uso del suelo

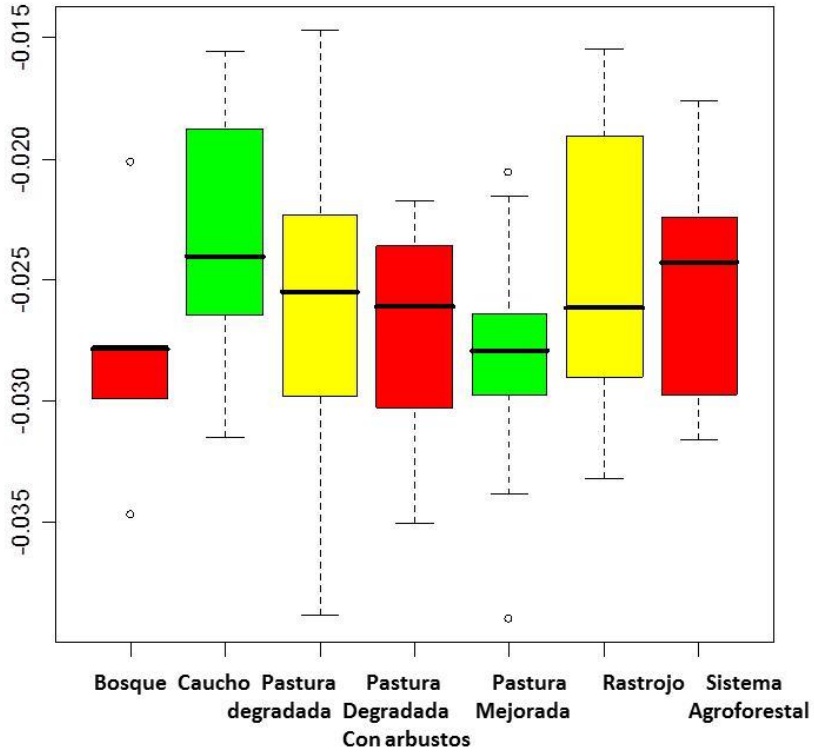


Figura 2-19: Abundancia de grupos C=O de acuerdo al sistema de uso del suelo

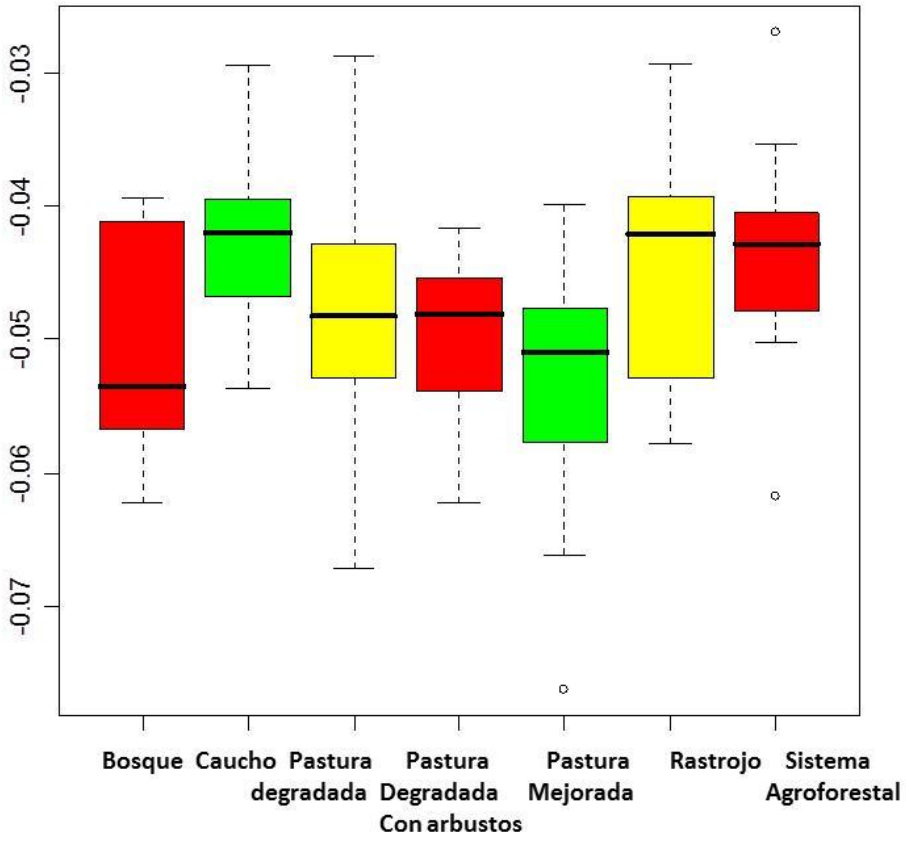
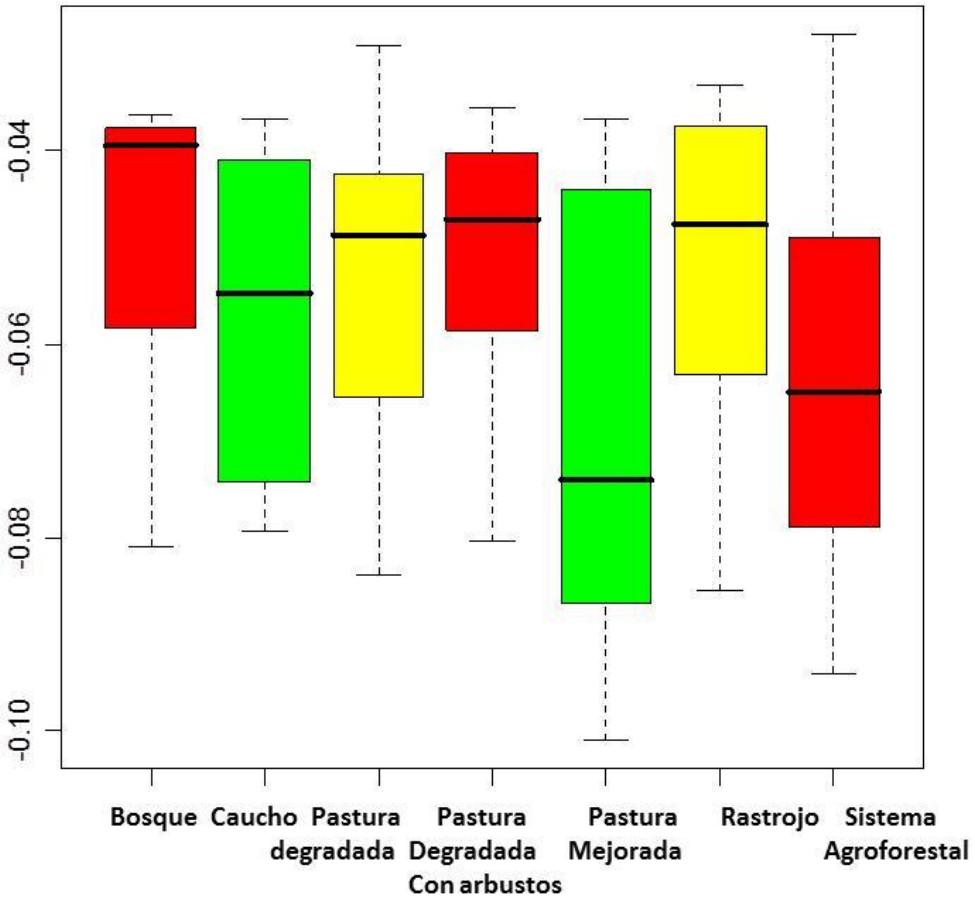


Figura 2-20: Abundancia de grupos C-H de acuerdo al sistema de uso del suelo



3.8 Determinación de almacenamiento de carbono en la biomasa aérea por medio de ecuaciones alométricas

En cada uno de los puntos se tomó en el muestreo vegetación considerando todos los grupos taxonómicos, se tomó la altura y el diámetro DAP a 1.30 m de altura utilizando un hipsómetro LaserAce y los transectos se efectuaron de la siguiente manera:

- Muestreo de árboles: Se empleó un transecto de 500 m² (10x50m) para las plantas leñosas de más de 10 cm de diámetro.
- Muestreo de arbustos: Se empleó un transecto de 250 m² (5x50m) para las plantas leñosas de menos de 10 cm de diámetro y más de 2 metros de altura.

Para la determinación del almacenamiento de carbono en la biomasa aérea se evaluaron varias ecuaciones alométricas existentes para la Amazonía pero finalmente se utilizó la de (Nelson et al, 1999), con el fin de no hacer un muestreo destructivo.

3.9 Discusión de resultados

De las 27 fincas evaluadas en los sitios de muestreo en Colombia, 9 correspondieron al Sistema Convencional de ganadería extensiva de doble propósito, monocultivo de gramíneas, un animal o menos por hectárea y sin suplementación alimenticia (80 años), 9 al Sistema Silvopastoril, ganadería de doble propósito, suplementación con forraje de alta calidad, gramínea en pastoreo, bancos de proteína y más de un animal por hectárea (60 años) y 9 al Sistema Agroforestal, ganadería de doble propósito, suplementación con forraje de alta calidad, gramínea en pastoreo, bancos de proteína, producción agroforestal de caucho con frutales amazónicos y más de un animal por hectárea (20 a 30 años).

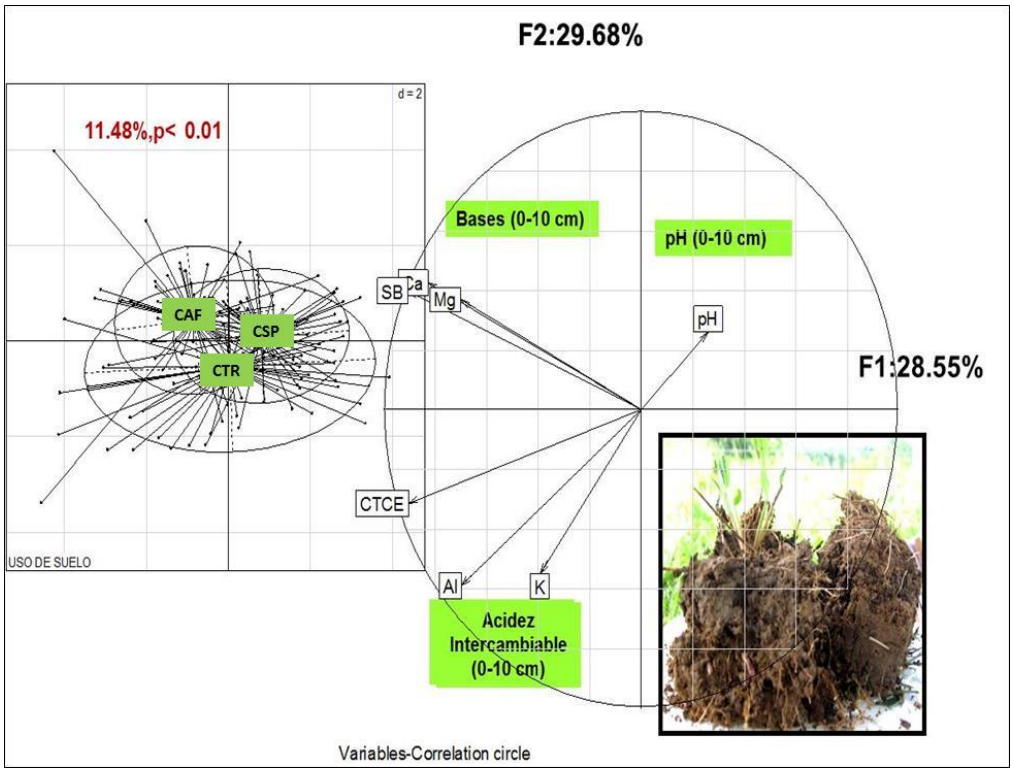
3.9.1 Propiedades químicas del suelo

Se establecieron las propiedades químicas del suelo en la profundidad de 0 a 10 cm (pH, materia orgánica, P, %C, %N, Ca, Mg, Na, K, Al, Fe, Cu, Zn y Mn), ver Anexo 1.

El análisis multivariado indicó una separación significativa de los sistemas en función de éstas variables químicas ($p<0,01$). Los dos primeros componentes del ACP explican el 58,23% de la variabilidad total de los datos. El primer componente (28,55%) separa principalmente los sistemas con mayores niveles de bases siendo el sistema agroforestal el que exhibió los mayores valores. El componente 2 (28,55%) muestra un fuerte efecto de la acidez intercambiable, con valores más altos para el sistema convencional, Figura 2-21. Los sistemas convencionales presentan un mayor grado de acidez en los suelos lo cual es consecuencia de suelos en los que se esta perdiendo la capa arable por erosión, existe una extracción de nutrientes por monocultivos extensivos, la deforestación y escaso uso de técnicas de diagnóstico de fertilidad de los suelos. Un comportamineto opuesto, se observa en el sistema agroforestal.

.

Figura 2-21. ACP y Circulo de correlación para los parámetros de pH, acidez intercambiable y bases

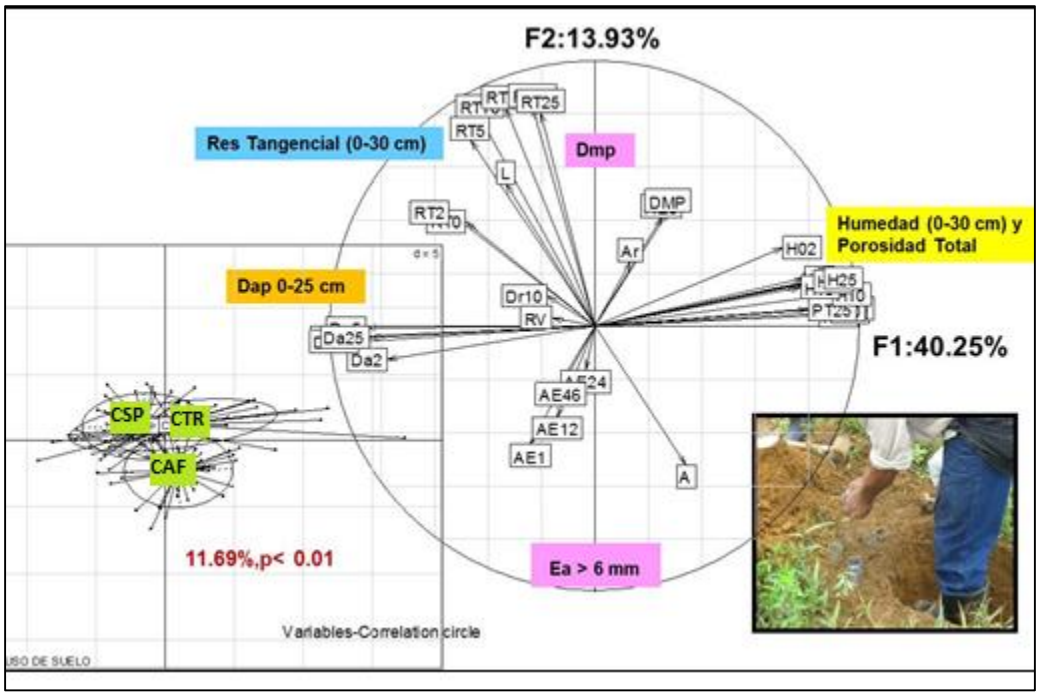


3.9.2 Propiedades físicas del suelo

Las propiedades físicas evaluadas fueron la granulometría, densidad aparente, infiltración del agua, retención de agua mientras para establecer la resistencia del suelo se usó el penetrómetro y torcómetro (Ver Anexo 1).

El análisis multivariado indicó una separación significativa de los sistemas en función de éstas variables físicas ($p<0,01$). Los dos primeros componentes del ACP explican el 54,18% de la variabilidad total de los datos. El primer componente (40,25%) separa principalmente los sistemas con suelos más compactados con los mayores valores de densidad aparente y contenido de arcilla siendo el sistema convencional con pasturas degradadas y exceso de pastoreo el que mostró éste comportamiento. El componente 2 (13,93%) muestra un fuerte efecto de la estabilidad de agregados, mayores niveles de arena y menor resistencia tangencial para el sistema agroforestal, Figura 2-22.

Figura 2-22: ACP y Circulo de correlación para los variables físicas del suelo



3.9.3 Morfología del suelo

En el campo se realizaron 540 monolitos de 0 a 10 cm de profundidad (Figura 2-23) y en estas muestras fueron cuantificados los agregados biogénicos(AB), agregados ligados a las raíces (AR) y agregados físicos (AF), empleando la metodología Velasquez et al. (2007).

Agregados Biogénicos: Producidos por macroinvertebrados (principalmente lombrices de tierra y termitas, larvas de coleópteros y diplópodos). Estos agregados, tienen generalmente forma redondeada y color más oscuro que los otros agregados

Agregados de Raíces: Son hechos de suelo atascado en las raíces y tienen variables formas. Si ellos han sido producidos por invertebrados, ellos son clasificados como biogénicos.

Agregados Físicos: Producidos por procesos físicos (procesos de sequedad y humedad del suelo)

Material remanente: Consistente de raíces, hojas en diferentes estados de descomposición, tallos, invertebrados, semillas y piedras.

Figura 2-23: Monolito de suelo (0 a 10 cm)

Figura 13. Monolito de suelo (0 a 10 cm)

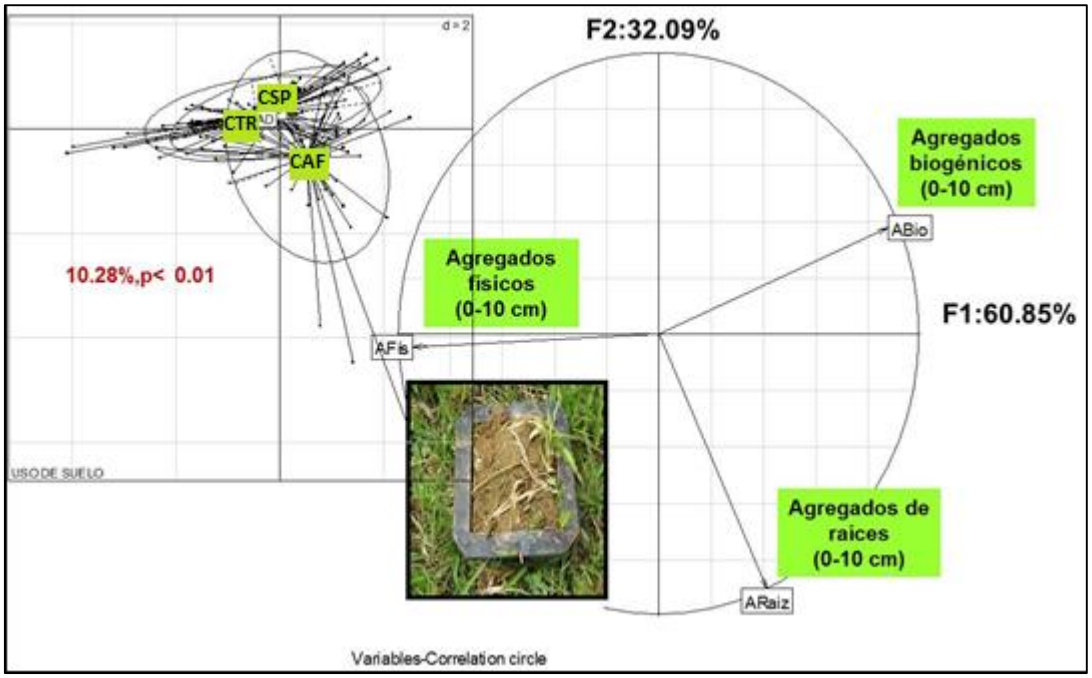
3.9.4 Resultados obtenidos en la agregación del suelo

Como parte de una tesis de pregrado se hicieron en el campo 540 monolitos de 0 a 10 cm de profundidad (Figura 2-5) y en estas muestras fueron cuantificados los agregados biogénicos(AB), agregados ligados a las raíces (AR) y agregados físicos (AF), empleando la metodología Velasquez et al. (2007).

El análisis multivariado indicó una separación significativa de los sistemas en función del tipo de agregado ($p<0,01$). Los dos primeros componentes del ACP explican el 92,94% de la variabilidad total de los datos. El primer componente (60,85%) separa principalmente los sistemas con suelos con mayor contenido de agregados físicos consecuencia de procesos de humedad y sequedad del suelo, como es el caso de los sistemas convencionales de pasturas. El componente 2 (32,09%) separa el sistema con mayor presencia de agregados biogénicos y de raíces como es el caso del agroforestal (Figura 2-24).

Los sistemas silvopastoriles son aún muy jóvenes para presentar una diferenciación en agregación comparada al convencional. La mayor diferencia con el sistema agroforestal, viene de su mejor agregación del suelo, lo cual es una consecuencia de la presencia de árboles en sus fincas.

Figura 2-24: ACP y Circulo de correlación para los diferentes tipos de agregados encontrados en el suelo



3.9.5 Almacenamiento de carbono en el suelo

Las muestras de suelo para establecer el almacenamiento de carbono en el suelo, se tomaron en 27 fincas con 4 repeticiones a las profundidades de 0-10, 10-20 y 20-30 cm efectuándose 540 calicatas. Los sistemas de pastura, exhibieron los menores valores promedio de almacenamiento de carbono en el suelo de 46,11 ton C/ha mientras en los sistemas silvopastoriles y agroforestales se encontraron niveles promedio de 52,83 ton C/ha, ver Figura 2-25.

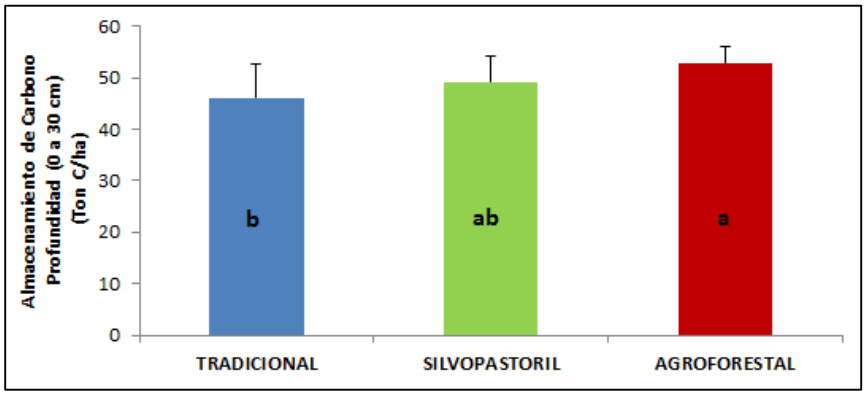
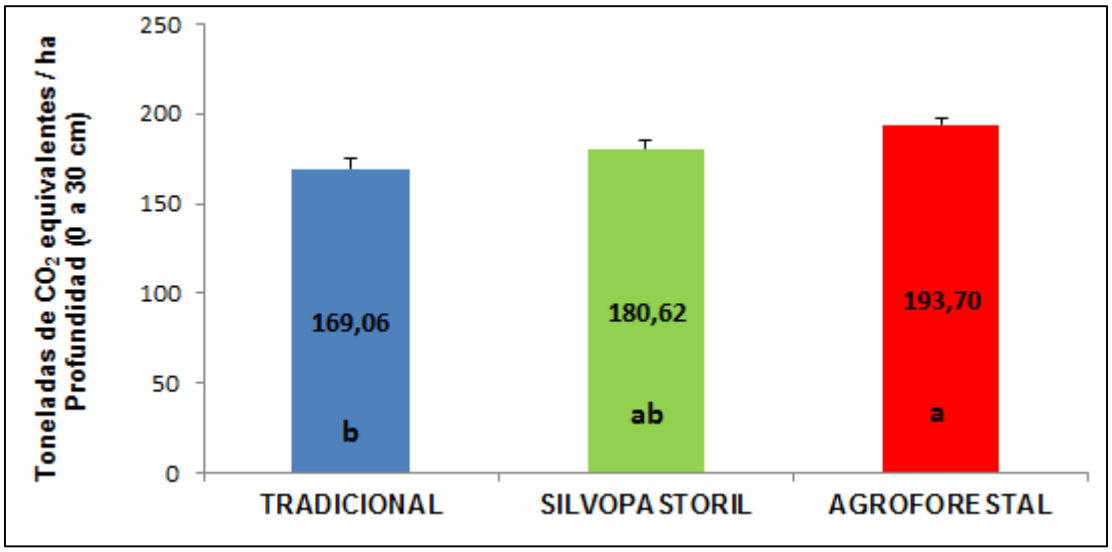


Figura 2-25: Niveles de almacenamiento de carbono en los sistemas de uso de suelo en estudio

En la figura 2-26, se encuentran graficados los factores de emisión de acuerdo al IPCC para los tres sistemas de uso de suelo.

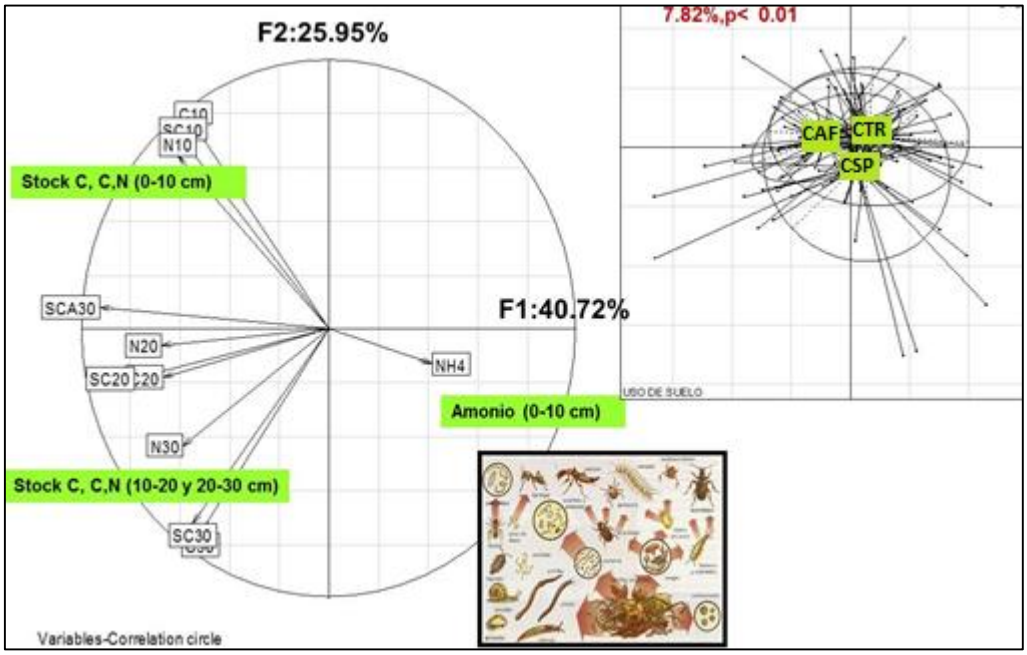
Figura 2-26: Factores de emisión de acuerdo al IPCC para los tres sistemas de uso de suelo



El análisis multivariado indicó una separación significativa de los sistemas en función del almacenamiento de carbono ($p<0,01$). Los dos primeros componentes del ACP explican el 66,67% de la variabilidad total de los datos. El primer componente (40,72%) separa principalmente los sistemas con suelos con el mayor almacenamiento de carbono y nitrógeno en la profundidad hasta 30 cm siendo el sistema agroforestal el que presenta ésta tendencia. El componente 2 (25,95%) muestra un efecto de los niveles de carbono y nitrógeno en la primera profundidad, Figura 2-27.

Los sistemas con mayor presencia de árboles gneran incrementos en el almacenamiento de carbono del suelo y de la biomasa aérea al mejorarse la agregación del mismo. Por lo anterior, el sistema de pastura generó los valores más bajos.

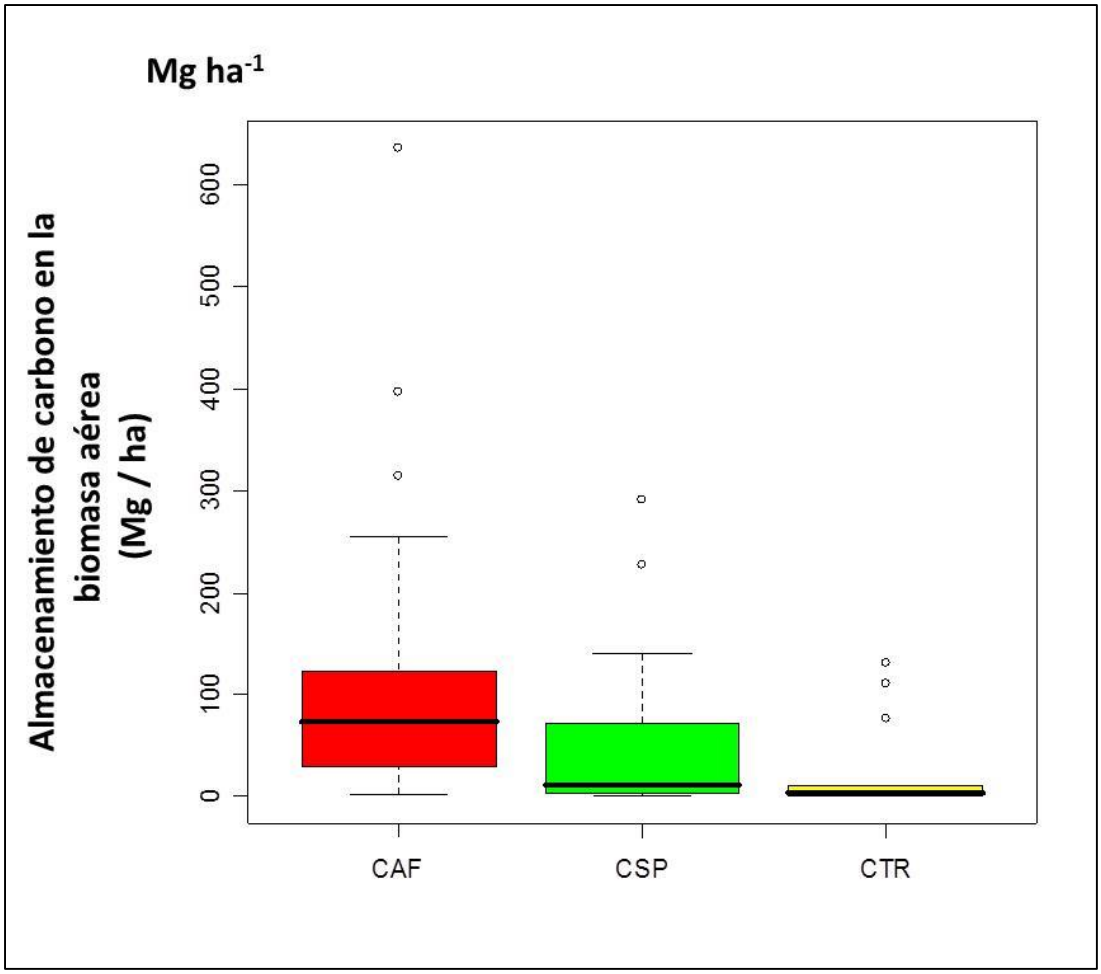
Figura 2-27: ACP y Circulo de correlación para los parámetros de almacenamiento de cabono y contenido de nitrógeno en las tres profundidades



3.9.6 Almacenamiento de carbono en la biomasa aérea

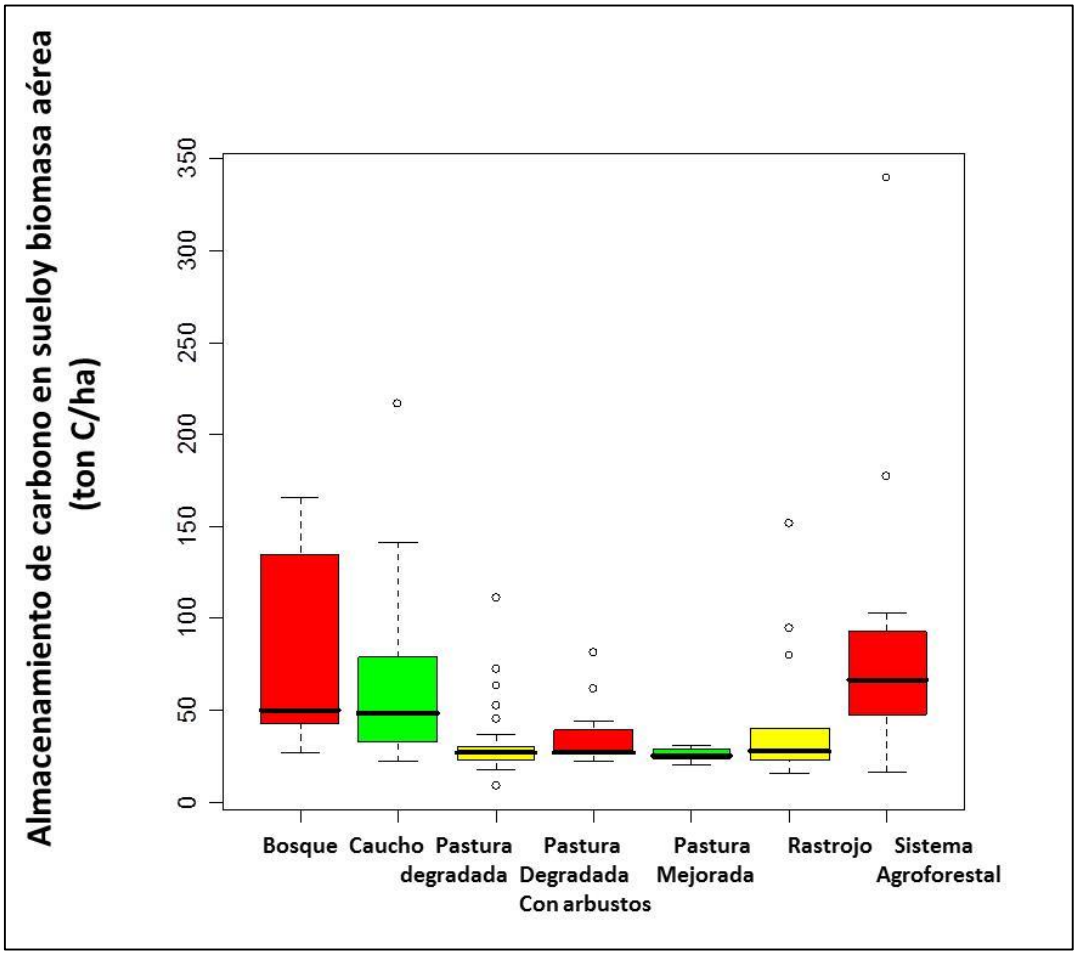
Para establecer el almacenamiento de carbono en la biomasa aérea, se empleó ecuaciones alométricas genéricas existentes para la Amazonía de Brasil (Nelson et al, 1999), con el fin de no hacer un muestreo destructivo. Se obtuvieron valores promedio de 108.04, 48,80 7 25,77 Mg C/ha para los sistemas agroforestal, silvopastoril y convencional respectivamente, Figura 2-28. Los mayores valores encontrados son debidos a sistemas que proveen materia orgánica de lenta descomposición

Figura 2-28: Almacenamiento de carbono en biomasa aérea, en diferentes sistemas de uso de suelo



Al considerar simultáneamente los niveles de carbono en el suelo y en la biomasa aérea en los diferentes sistemas de uso, las pasturas degradadas exhibieron los menores valores mientras el agroforestal exhibió una mayor capacidad de almacenamiento de carbono (ver Figura 2-29).

Figura 2-29: Almacenamiento de carbono en suelo y biomasa aérea, en diferentes sistemas de uso de suelo



Aunque se observaron diferencias altamente significativas, el uso del suelo explicó solo el 11.51% mientras la finca el 47% de la variación. En la Figura 2-30, se ve la tendencia de ésta propiedad del suelo en las 27 fincas de estudio en el Piedemonte Amazónico Colombiano.

El sistema global tiene sus diferencias y existe mucha variación entre las fincas, lo cual es un efecto del manejo individual de sus propietarios pues no todos establecieron adecuadamente bien los sistema de uso de suelo.

Figura 2-30: Almacenamiento de carbono en suelo y biomasa aérea, en las 27 fincas de los 3 sistemas de estudio

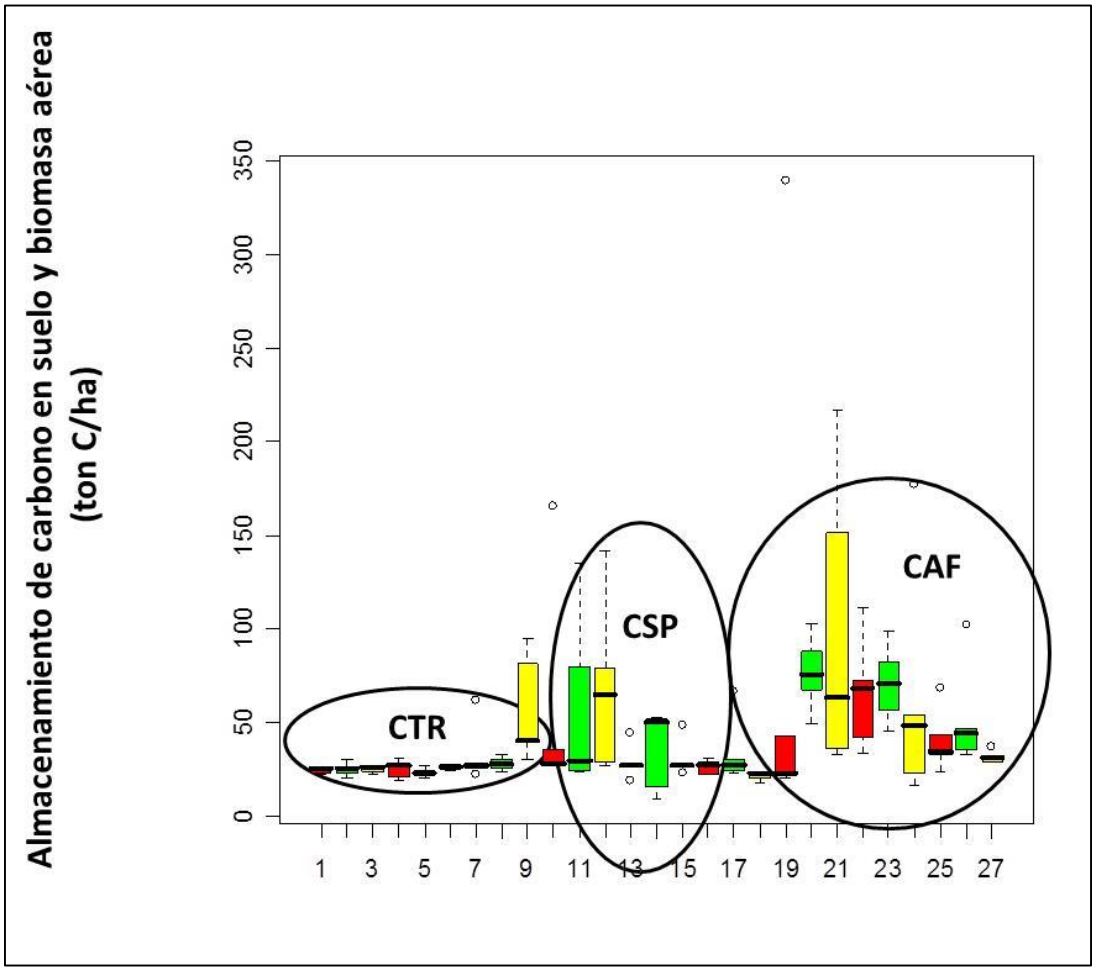
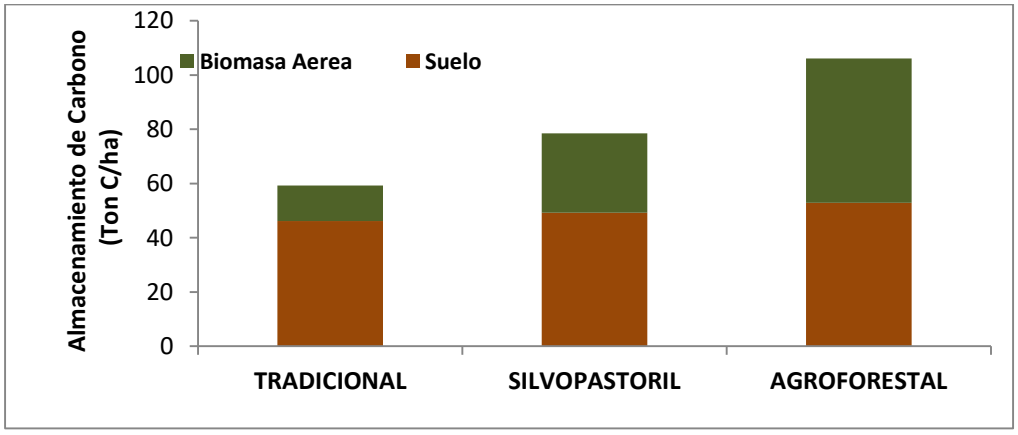
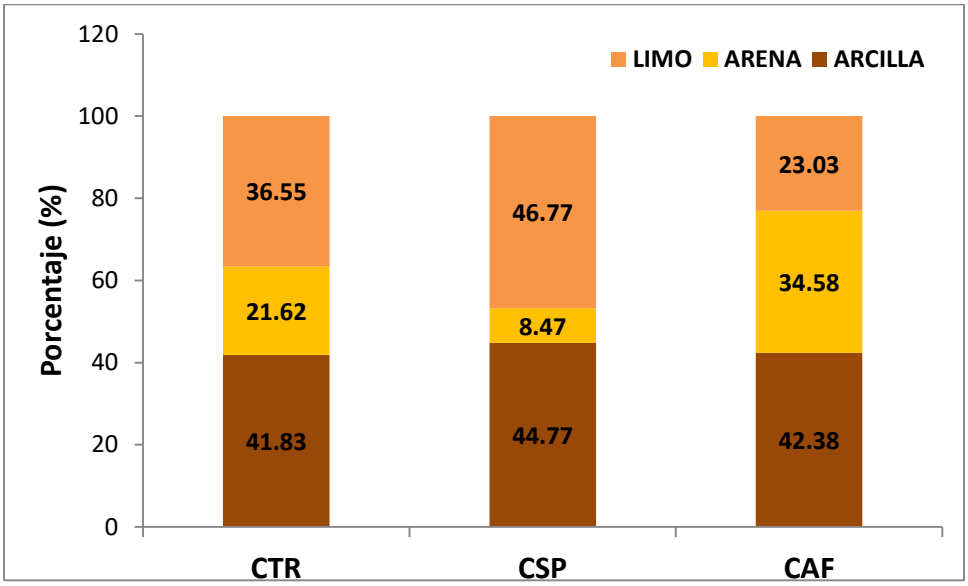


Figura 2-31: Almacenamiento de carbono en suelo y biomasa aérea, en las 27 fincas de los 3 sistemas de estudio



De ésta manera pudimos confirmar la hipótesis planteada donde el tipo de uso de suelo tiene influencia directa en el incremento del almacenamiento de carbono en la biomasa aérea y en el suelo, cuando existe vegetación arbórea que produce materia orgánica de lenta descomposición.

Figura 2-32: Textura del suelo en los 3 sistemas de estudio



4. Dinámica de la materia orgánica en diferentes usos de suelo

Los microorganismos tienen la habilidad de digerir cualquier tipo de materia orgánica y moléculas orgánicas del suelo. Sin embargo, dado que tienen capacidades extremadamente limitadas para moverse, se vuelven inactivos tan pronto como el recurso orgánico se agota en su entorno inmediato y solo recuperaran la actividad, cuando un ingeniero del ecosistema, invertebrados, raíces o algún dispositivo operado por el hombre, mezcla el suelo y mediante este proceso, denominado bioturbación, mueve los microorganismos al contacto de nuevos recursos orgánicos (Lavelle 2018).

Este proceso puede ocurrir en el intestino de los invertebrados donde se ha detectado un sistema de digestión mutualista. Los microorganismos son despertados por la intensa mezcla y adición de agua y pequeñas cantidades de glicoproteínas altamente energéticas, operadas en el intestino. Además, digieren la materia orgánica ingerida, en beneficio del invertebrado que generalmente carece de enzimas para efectuar esta digestión por sí mismos.

Los ingenieros del ecosistema utilizan la energía obtenida a través de este proceso para mejorar las condiciones generales del suelo, mediante la creación de agregación de partículas orgánicas y minerales del suelo en agregados estables y la contribución a la porosidad, mediante canales y galerías y los vacíos creados entre los gránulos y las heces fecales depositadas en el suelo. Los poros y agregados, son componentes esenciales de la estructura física del suelo que determina todos los servicios relacionados con el almacenamiento y la liberación de agua de los suelos: la capacidad de los suelos para infiltrarse, almacenar y liberar el agua de lluvia en las plantas, los organismos del suelo y los niveles freáticos. También permiten que los suelos resistan la erosión.

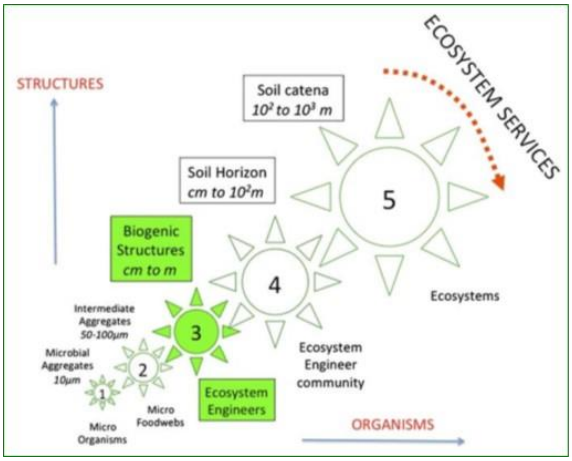
La bioturbación del suelo mantiene otra función muy importante del suelo, la liberación de nutrientes cuando la descomposición llega al producto mineral final. En paralelo, la materia orgánica es almacenada y secuestrada en macroagregados estables donde se detiene la actividad microbiana, siempre y cuando se conserven los agregados. Los moldes de lombrices de tierra expulsados después de la digestión de las construcciones de termitas son ejemplos de estas estructuras macroagregadas (Lavelle 2018).

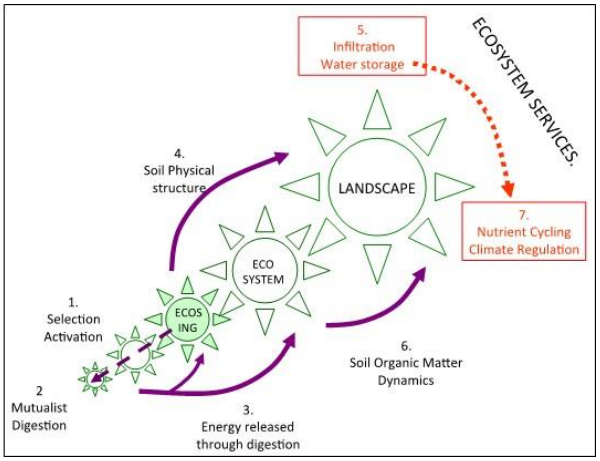
Esta cadena de interacciones entre los microorganismos y los ingenieros de ecosistemas, permite la provisión de servicios ecosistémicos basados en el suelo que comprenden al menos el 60% de todas las funciones ecológicas denominadas servicios ecosistémicos (Lavelle et al., 2006).

Los suelos pueden representarse como una máquina hecha de ruedas de diferentes tamaños (que representan las escalas espaciales y temporales en las que opera el

sistema representado). De una rueda a otra, y de una escala a otra, esta máquina opera funciones y produce los servicios finales del ecosistema, a gran escala de un ecosistema o un paisaje (Figura 3-1). Dos afirmaciones principales se pueden inferir de esta representación. Una es la importancia de los insumos orgánicos como combustible para activar la máquina, la segunda es la importancia de mantener la integridad del sistema para sostener la provisión de servicios ecosistémicos.

Figura 3-1: Izquierda: modelo general de autoorganización en suelos que integra organismos, ecosistemas y paisajes y las estructuras creadas a cada escala; Derecha: Interacciones y mecanismos que sostienen la liberación de servicios ecosistémicos a escala del paisaje (Lavelle et al., 2006).

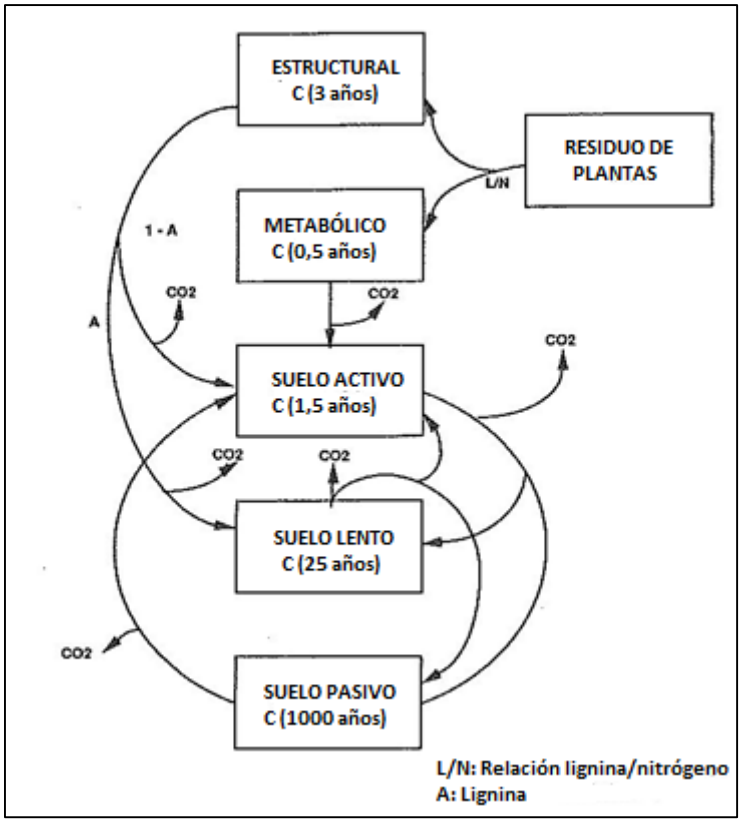




Las plantas fijan el carbono atmosférico y los nutrientes del suelo y los incorporan dentro de sus tejidos. Mientras ellos viven, las plantas los liberan como metabolitos en los exudados de las raíces, a nivel foliar y lixivia dentro del suelo. Estos son suplementados con subproductos microbianos, mucus animal y polisacáridos para formar parte de la materia orgánica metabólica definida por Parton et al, (1983).

Cuando los organismos mueren entran en contacto con el suelo y comienzan a descomponerse. La biomasa de éstos organismos se divide arbitrariamente en materiales degradables (biomasa de los todos los organismos vivos, microorganismos y fauna del suelo) y resistentes (poseen protección física ó química a la descomposición y la materia orgánica se acumula con diferentes niveles de resistencia a ser degradados). Estos niveles han sido separados en compartimientos como los del modelo de Parton et al (1983), ver Figura 3-2.

Figura 3-2: Diagrama de flujo para la dinámica del carbono en ecosistemas terrestres mostrando los cinco principales compartimientos.

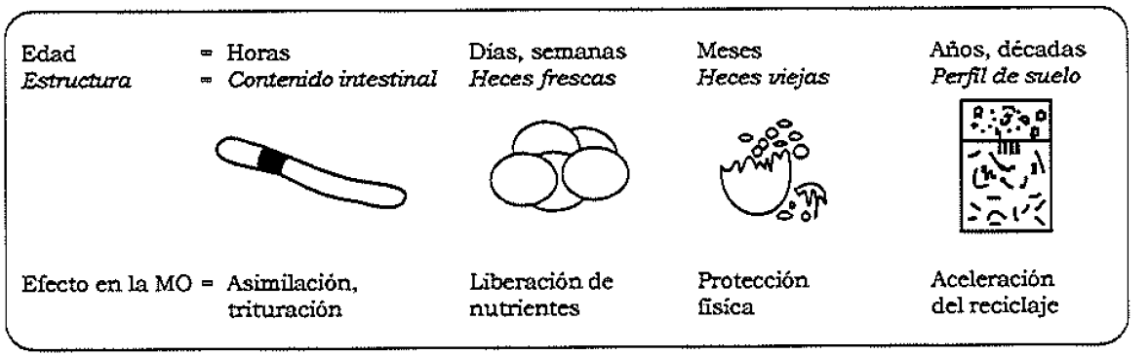


Los residuos de las plantas, la biota del suelo y los metabolitos asociados a ellos conforman la fracción activa del carbono orgánico del suelo, la cual posee periodos de residencia de la orden de 18 meses en condiciones de clima templado; la fracción pasiva, que puede persistir por años o décadas (25 años en promedio en suelos de zonas templadas), y la fracción resistente, que persiste durante siglos y milenios (Jenkinson & Rayner, 1977; Parton et al 1983). Estas fracciones contienen carbono, nitrógeno, fósforo y azufre, pero la activa y la pasiva son las que controlan la liberación de nutrientes, cumpliendo de esta manera un papel importante en el funcionamiento de los ecosistemas y la sostenibilidad de la agricultura.

4.1 Fauna del suelo, raíces y macroagregación

Las lombrices digieren la materia orgánica, empleando enzimas producidas por ellas mismas y mediante la microflora mutualista que se encuentra en su tracto digestivo. Los efectos causados por las lombrices en la dinámica de la MO dependen de las escalas espacio-temporales consideradas (Lavelle, 1997), Figura 3-3.

Figura 3-3: Efectos Causados por las lombrices en la materia orgánica del suelo a diferentes niveles de una escala temporal y una espacial



En un intervalo corto de tiempo, de unas horas, la digestión de la lombriz rompe los residuos orgánicos y libera algunos nutrientes, como el nitrógeno (N) y el fósforo (P), que pueden entonces ser asimilados por las plantas (Sharpley y Syers 1976; Barois et al. 1987; Lavelle et al. 1992). En periodos intermedios de tiempo (de días a meses), se altera la dinámica de la MO en el interior de las estructuras biogénicas. En un periodo más largo se produce un descenso en la tasa de mineralización de la MO hasta llegar a la inmovilización del proceso (Martin 1991). Este proceso se debe a la protección física de la MO que No se conoce aún el efecto general a largo plazo (de años a décadas), porque no se han realizado experimentos tan prolongados en el tiempo (Lavelle 1997).

La descomposición de la materia orgánica es una combinación de dos procesos contrastantes. El primero es la mineralización, el cual está asociado con la desaparición de la materia orgánica y su reducción a componentes minerales y la humificación el cual permite la formación de materiales poliméricos y componentes resistentes a la descomposición, (Lavelle & Spain, 2001).

En zonas donde aun existe vegetación natural que no ha sido alterada, los contenidos de materia orgánica son relativamente constantes y las entradas de carbono en forma de materia en descomposición son similares a las salidas en forma de CO_2. Sin embargo, los cambios en el clima, la cobertura vegetal y los aportes de biomasa, alteran los tiempos de residencia de la materia orgánica en el suelo (Anderson, 1992).

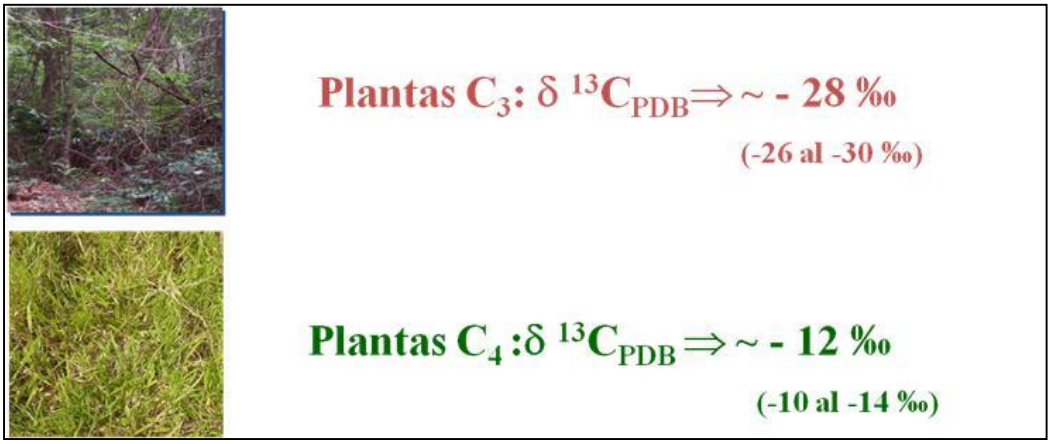
4.2 ^{13}C de la materia orgánica como integrador de los cambios en la vegetación

La discriminación isotópica, es una herramienta vital en estudios de la dinámica y la composición de la materia orgánica en sistemas de bosques y pasturas, ya que permite investigar la edad de los pool de carbono orgánico del suelo movilizado y asimilado por las lombrices, permite distinguir agregados biogénicos de agregados físicos por sus diferencias químicas a pesar de ser morfológicamente muy parecidos y son buenos indicadores junto con el carbono del origen de los agregados del suelo (Roscoe, R. 2004; Bossuyt et al, 2005; Fonte, S.J. 2007; Jouquet, P. et al 2008; Don A. et al, 2008; Meersmans, J. et al, 2009).

Una forma de evaluar la dinámica del C en suelos que han experimentado cambios de vegetación de bosque a pasturas o de pasturas a bosque es medir el contenido en ^{13}C (Paul et al., 2001; Dignac, 2005).

Durante la fotosíntesis ocurre una discriminación isotópica de ^{13}C, con intensidades diferentes en plantas C_3 y C_4 haciendo de los análisis isotópicos, una herramienta valiosa para monitorear cambios en las cantidades y orígenes de carbono orgánico del suelo y su dinámica temporal (Cerri y Martin et al., 1990) Figura 3-4. Cuando se sustituyen plantas en C4 en un sistema que tenía solamente plantas en C3, como es introducir gramíneas en bosques tropicales (o plantas C3 en sistemas dominados por plantas en C4, cuando se deja crecer el estrato arbóreo al proteger una savana del fuego) se observan cambios en las abundancias de ^{13}C por la presencia de las plantas C_4 que demuestran que C fijado por las gramíneas se sustituye progresivamente al carbono fijado en épocas anteriores por relictos de selva (Carvajal et al, 2009).

Figura 3-4: Variación de la señal isotópica de las plantas C_3 y C_4



Para los estudios de carbono en el suelo, la razón entre los isótopos ^{12}C y ^{13}C es de gran relevancia. El porcentaje de ^{13}C en la naturaleza es de 1.11% en términos globales. Sin embargo, se encuentra en diferentes concentraciones en los diferentes compartimentos de la biota (en los tejidos vegetales y en la materia orgánica del suelo). Estas diferenciaciones han sido usadas como una forma eficiente de identificar el origen de la materia orgánica del suelo. Basados en ésta técnica Cerri et al 1985; Cerri et al 1991; Martin et al 1991 y Cerri et al, 2004, identificaron la dinámica del carbono en el suelo, cuando un bosque (plantas C_3) ha sido sustituido por gramíneas (plantas C_4).

De otra parte, la evaluación del ^{15}N puede proporcionar información sobre los principales procesos de transformación y las pérdidas de nitrógeno en los ecosistemas (Watzka et al., 2005); debido a que en aquellos en los que se presentan mayores pérdidas de nitrógeno, aumentan los contenidos de ^{15}N, contrario a lo que sucede en los que poseen ciclos de N relativamente cerrados (no sujetos a adiciones significativas de N de la atmosfera o por fertilizantes) (Eshetu, 2004). Se sabe que la concentración en ^{15}N aumenta con el grado de humificación de la materia orgánica y el aumento de ^{15}N en sistemas que sufren pérdidas puede estar ligado a la concentración más alta de materia organica resistente altamente humificada (Hyodo, et al, 2008).

En la Amazonia brasileña, Escobar y Toriatti Dematte (1991) evaluaron la distribución de la materia orgánica y de ^{13}C en suelos de selva húmeda tropical y pastizal de 15 años (*Paspalum notatum*), concluyendo que los pastizales habían ocasionado durante este tiempo una disminución de 57.5 t C ha^{-1}, representada en una pérdida del 25% del carbono total en relación con el bosque natural. Además, se encontró que en los suelos de los pastizales entre 14 y 30 cm de profundidad, más del 70% del carbono era proveniente de la selva, indicando la posibilidad de que en estos suelos no se hubiera alcanzado un nuevo equilibrio en la movilización de carbono.

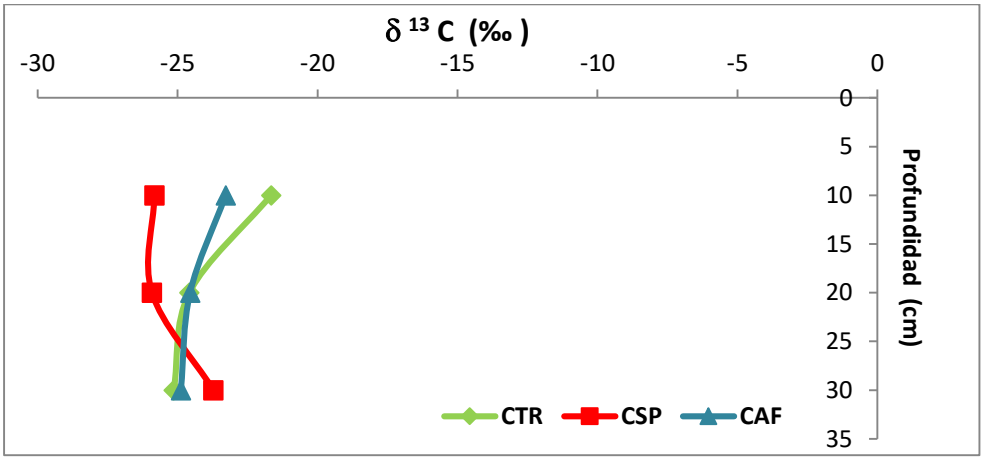
Otros estudios de Desjardins et al (2004) y Fisher et al (2004), proponen datos contradictorios, con el mantenimiento del almacenamiento de carbono y hasta un aumento del mismo, debido a la producción masiva de raíces por ciertas gramíneas introducidas. Lo anterior, es una muestra clara que los tipos de uso y el tipo de plantas utilizadas en cada uno de ellos puede tener impactos muy contrastantes sobre la dinámica del carbono. Al efecto de las plantas, se adiciona el impacto negativo producido por el manejo de suelos en sistemas que dejan el suelo sin cobertura y/o que presentan erosión del suelo.

4.3 Origen de la materia orgánica en el suelo y procesos de transformación y pérdida de nitrógeno

Para los estudios de carbono en el suelo, la razón entre los isótopos ^{12}C y ^{13}C es de gran relevancia. El porcentaje de ^{13}C en la naturaleza es de 1.11% en términos globales. Sin embargo, se encuentra en diferentes concentraciones en los diferentes compartimentos de la biota (en los tejidos vegetales y en la materia orgánica del suelo). Estas diferenciaciones han sido usadas como una forma eficiente de identificar el origen de la materia orgánica del suelo.

En los tres sistemas de estudio se observa la señal isotópica en el rango de -19 **‰** a -26 **‰,** la cual es propia de plantas C3 ó bosques. Aunque el sistema convencional posee pasturas degradadas en su nivel de carbono aún se encuentra el proveniente del bosque que estuvo hace 80 años (Figura 3-5). En el sistema silvopastoril la señal $\delta^{13}C$ incrementa a partir de la profundidad de 20 cm mientras en el sistema agroforestal decrece con la profundidad.

Figura 3-5: Evolución de la señal $\delta^{13}C$, en el carbono orgánico del suelo hasta una profundidad de 30 cm para los tres sistemas en estudio

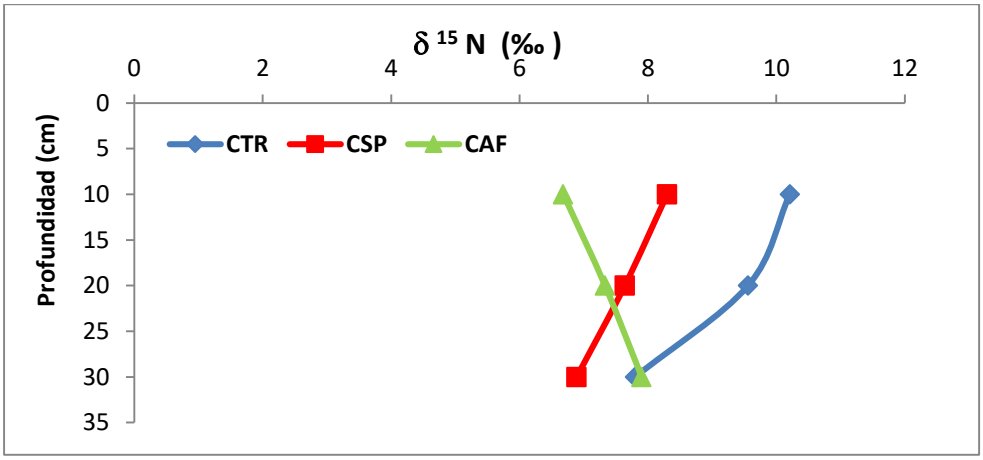


De otra parte, la evaluación del ^{15}N puede proporcionar información sobre los principales procesos de transformación y las pérdidas de nitrógeno en los ecosistemas (Watzka et

al., 2005); debido a que en aquellos en los que se presentan mayores pérdidas de nitrógeno, aumentan los contenidos de ^{15}N, contrario a lo que sucede en los que poseen ciclos de N relativamente cerrados (no sujetos a adiciones significativas de N de la atmosfera o por fertilizantes) (Eshetu, 2004).

En el sistema tradicional se observan las mayores pérdidas de nitrógeno, con un valor promedio en la señal $\delta^{15}N$ de 9,19 ‰ en contraste el sistema agroforestal exhibe un nivel de $\delta^{15}N$ de 7,30 ‰ para un rango de profundidad de 0 a 30 cm (Figura 3-6).

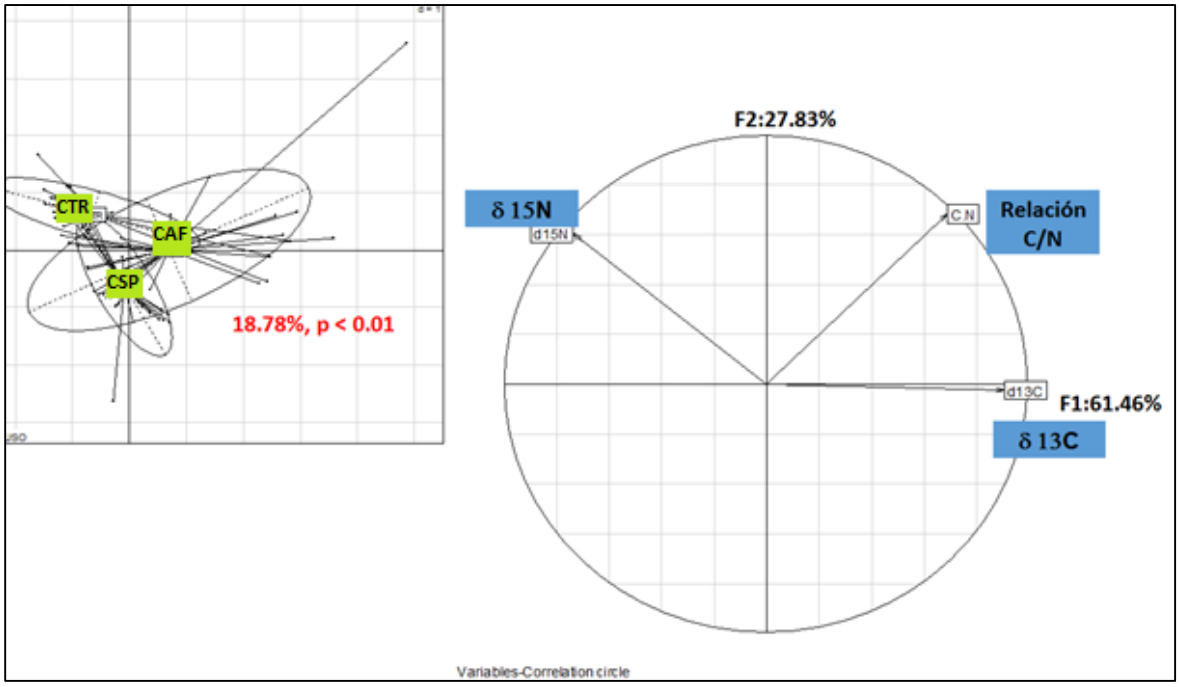
Figura 3-6: Procesos de transformación y pérdida de nitrógeno



Se evaluó la relación C/N y la señal $\delta^{15}N$ para evaluar la estabilidad de la materia orgánica del suelo, siguiendo el modelo descrito por Conen et al. 2008. Este modelo está basado sobre el fraccionamiento isotópico del isótopo estable ^{15}N durante la descomposición, la cual origina la disminución de la relación C/N durante la degradación del litter y la formación de la materia orgánica. El exceso de nitrógeno mineral es liberado por los microorganismos del suelo. El fraccionamiento isotópico durante ésta desamilación produce pérdida de ^{14}N del suelo, originando enriquecimiento de la señal $\delta^{15}N$ en la materia orgánica del suelo estable De Clercq et al. 2015.

El sistema agroforestal fue el sistema que presentó los valores más altos de C/N y menores valores de la señal $\delta^{15}N$, lo cual indica que presenta una materia orgánica menos estable. En contraste, el sistema tradicional con cobertura de pasturas, se caracteriza por presentar valores más altos de la señal $\delta^{15}N$ como consecuencia del sistema con la mayor pérdida de nitrógeno, Figura 3-7.

Figura 3-7: ACP y Circulo de correlación para las señales isotópicas de ^{13} C y ^{15}N en los tres sistemas de uso



Al evaluar los porcentajes de carbono de los agregados biogénicos, físicos, de raíces y suelo sin agregar no se encontraron diferencias significativas en los sistemas de uso que se estudiaron (Figura 3-8). Lo anterior, se debe a que los agregados no duran mucho tiempo, debido a que pasan de un tipo de agregación a otro debido a que su turnover es muy rápido.

Figura 3-8: Almacenamiento de carbono en el suelo, proveniente del bosque nativo y de la pastura para los 3 sistemas de estudio

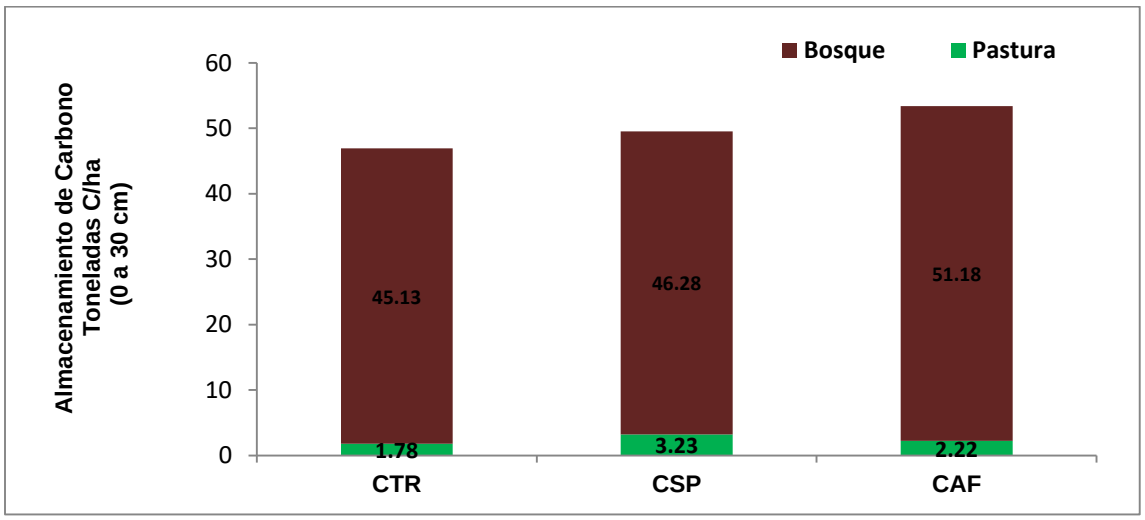


Figura 3-9: Distribución del almacenamiento de carbono en el suelo por profundidad proveniente del bosque nativo y de la pastura para el sistema tradicional.

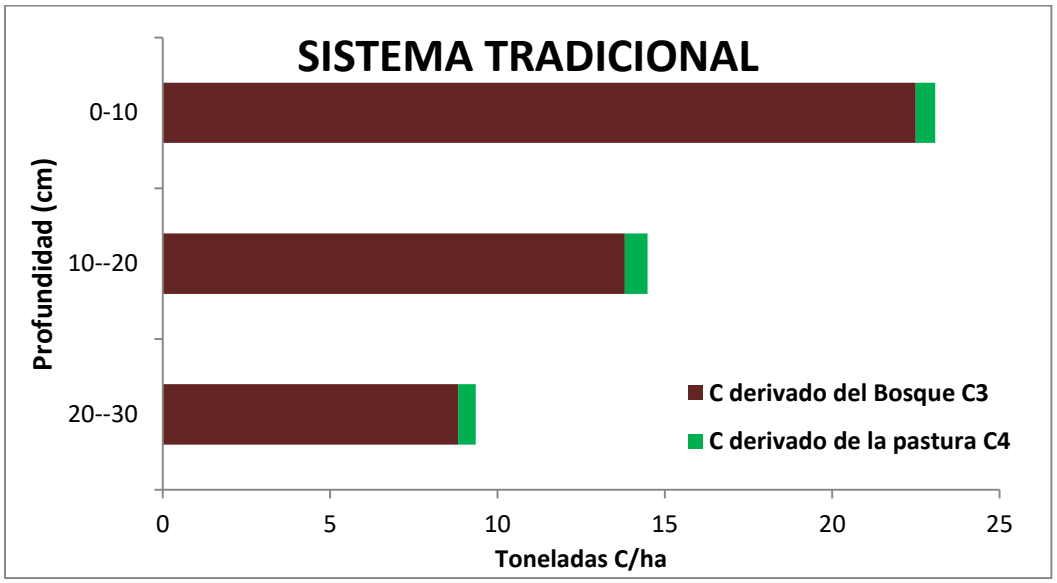


Figura 3-10: Distribución del almacenamiento de carbono en el suelo por profundidad proveniente del bosque nativo y de la pastura para el sistema silvopastoril

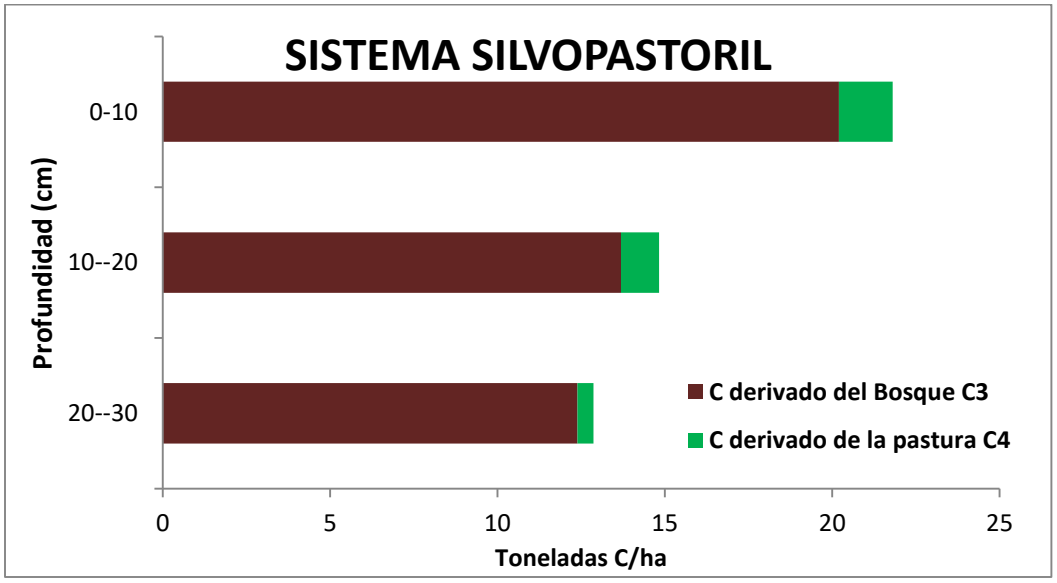


Figura 3-11: Distribución del almacenamiento de carbono en el suelo por profundidad proveniente del bosque nativo y de la pastura para el sistema Agroforestal

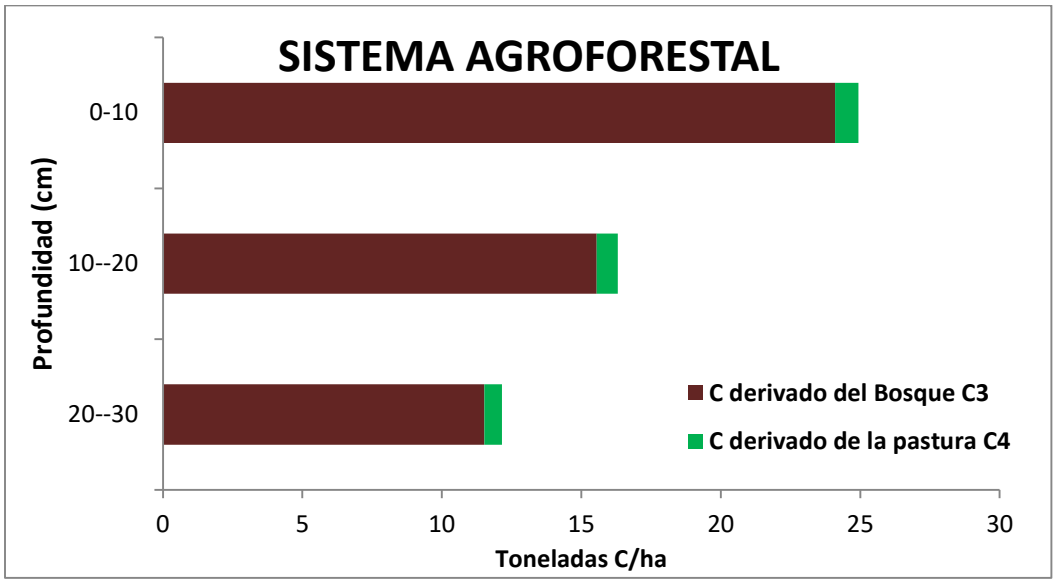
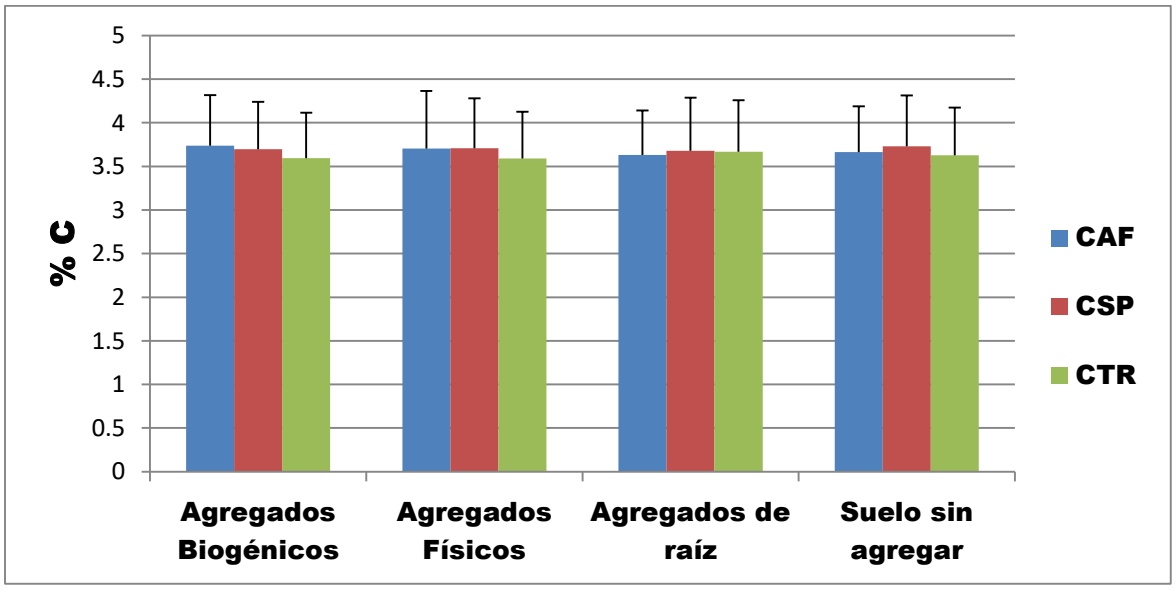


Figura 3-12 : Niveles de porcentaje de carbono de los diferentes tipos de agregados y suelo sin agregar para los 3 sistemas de uso de suelo



Con respecto a los agregados del suelo, en el sistema tradicional se encontró mayor presencia de agregados fisícos con unos niveles de $\delta^{15}N$ de -19,43 ‰ mientras en el sistema silvopastoril abundaron más los agregados biogénicos con una presencia de

$\delta^{13}C$ de -19,21 ‰. Por último en el sistema agroforestal se encontró mayor agregados de raíces con valores de $\delta^{13}C$ de -19,65 ‰, ver Figura 3-13.

Figura 3-13: Origen y distribución de la materia orgánica en los agregados biogénicos del suelo de los tres sistemas de uso

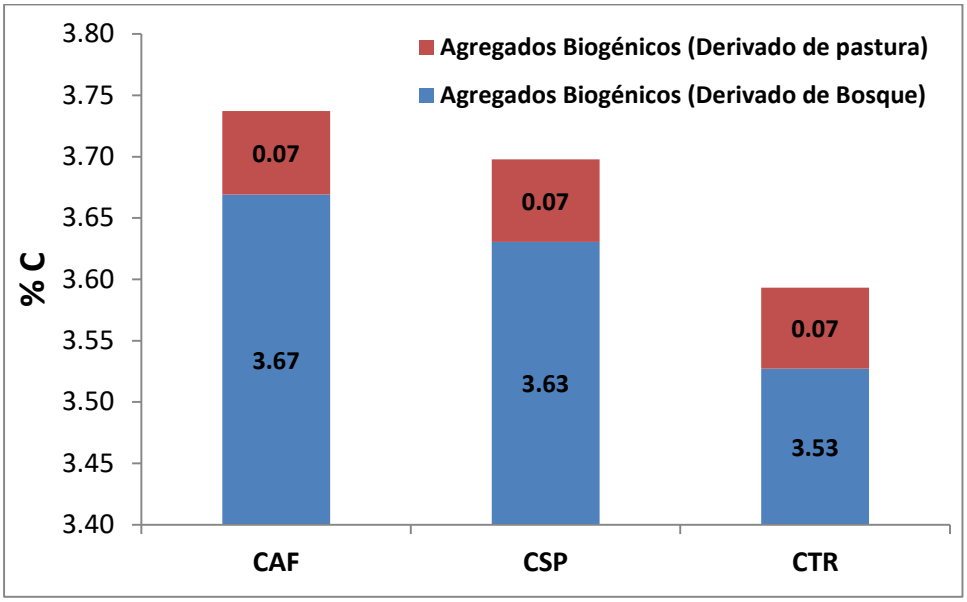


Figura 3-14: Origen y distribución de la materia orgánica en los agregados físicos del suelo de los tres sistemas de uso

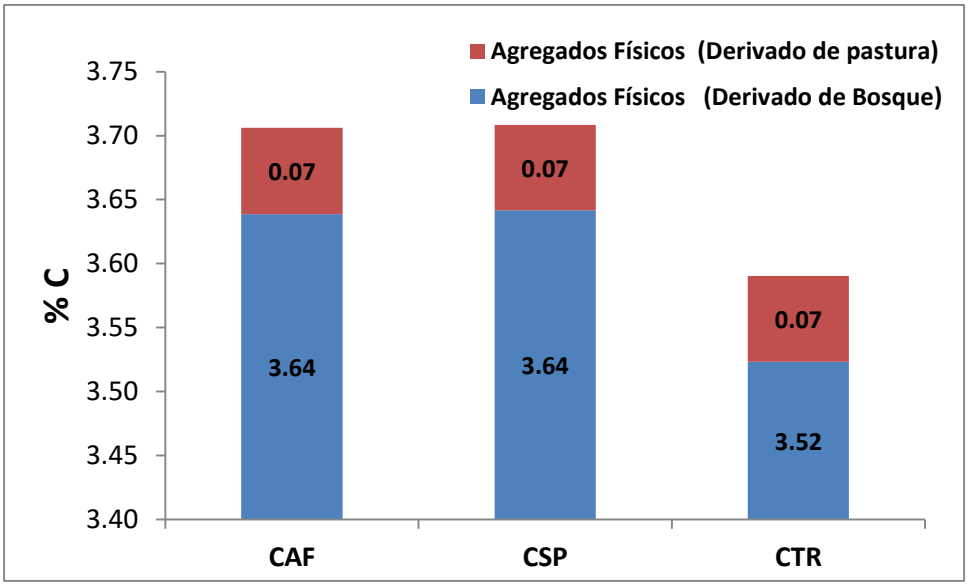


Figura 3-15: Origen y distribución de la materia orgánica en los agregados de raíz del suelo de los tres sistemas de uso

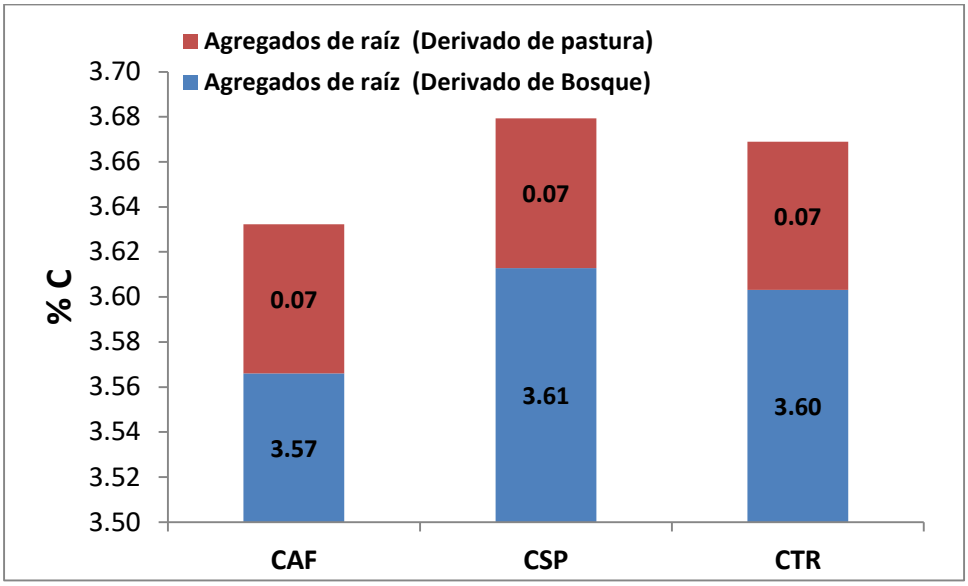
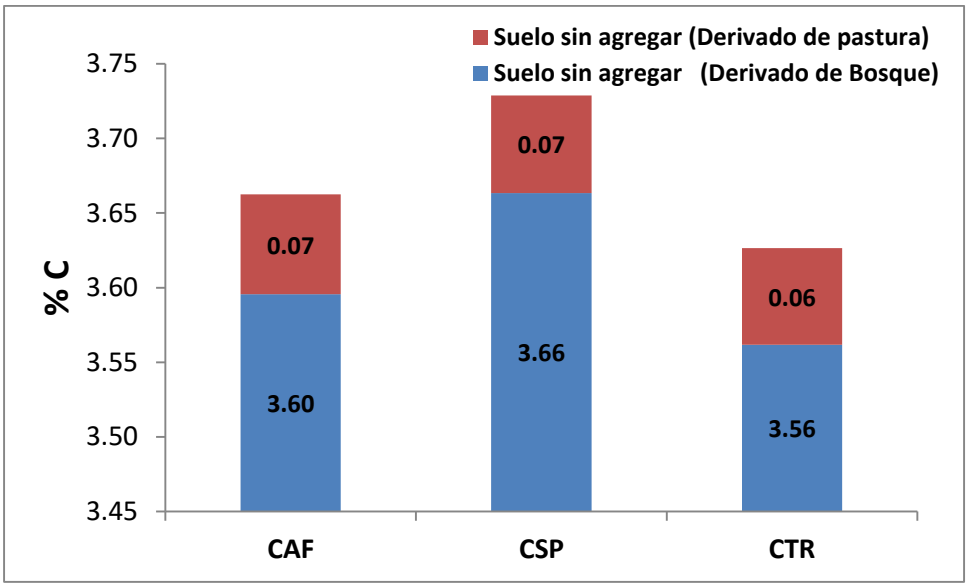


Figura 3-13: Origen y distribución de la materia orgánica en el suelo sin agregar de los tres sistemas de uso



Aunque los sistemas de uso de suelo, impactan el origen de la materia orgánica, se puede establecer que era correcta la hipótesis nula acerca que el origen del agregado

(físico, biogénico y de raíces), no determina el grado de estabilidad y el contenido de materia orgánica.

5. Modelización de la dinámica de la materia orgánica

La dinámica temporal y la evolución química de la materia orgánica en descomposición están determinadas por una serie de factores que operan a diferentes escalas:

1. El clima, a través de la temperatura y humedad que determinan las tasas posibles (Wall et al., 2009);

2. La naturaleza del suelo, en particular la abundancia y calidad de las arcillas que determina la conservación y intercambio de nutrientes en los procesos reguladores de estequiometria (Gentile et al., 2011);

3. La calidad de la materia organica producida (Palm and Sanchez, 1995);

4. Los microorganismos, raíces y macrofauna del suelo con sus actividades de ingeniería eco sistémica (Lavelle et al., 1992; Andersen et al., 2002);

5. La microflora del suelo que puede hacer cualquier transformación, a dentro de las restricciones de la estequiometría, de la forma en que las regulaciones impuestas a los niveles de regulación anteriores lo determinan (Lavelle et al., 1993).

Los modelos de materia orgánica, son usados para calcular el impacto del cambio global sobre la materia orgánica del suelo y efectos subsecuentes (Smith et al, 1997), donde los modelos son procesos orientados en multi compartimentos.

5.1 CANDY (Carbon- Nitrogen-Dynamics)

CANDY simula la dinámica del nitrógeno del suelo, la temperatura y agua con el fin de proveer información sobre la toma de nitrógeno de los cultivos, la lixiviación y la calidad del agua. CANDY usa un sistema para la descomposición del litter y calcula un tiempo activo biológico para permitir comparaciones entre sitios. La materia orgánica inerte, es calculada de la proporción de partículas del suelo menores a 6 micrómetros.

5.2 CENTURY

CENTURY fue desarrollado para simular la dinámica de la materia orgánica a largo plazo (décadas a siglos), crecimiento de las plantas y ciclaje de N, P y S. Esto fue desarrollado inicialmente para pasturas pero ha sido extendido a cultivos agrícolas, bosques y sistemas de sabana (Parton, 1996b). Este modelo, usa datos máximos y mínimos promedio con una periodicidad mensual de variables como temperatura y precipitación. Adicionalmente, consta de dos formas de litter: metabólico y estructural y tres compartimentos de materia orgánica: activo, lento y pasivo. El carbono del compartimento de materia orgánica activa, es particionado dentro de cualquier forma lenta ó dióxido de carbono y es determinado por la textura del suelo. La textura del suelo, también regula la velocidad de transferencia entre la forma lenta y pasiva. CENTURY ha sido usado para simular acumulación de carbono durante la formación del suelo y cambios en el almacenamiento de carbono siguiendo escenarios de cambio de clima. Tiene como inconveniente no tomar en cuenta cambios en las propiedades físicas (usa un dato de densidad aparente que no cambia en toda la simulación) y como todos los otros, no toma en cuenta la actividad de la macrofauna del suelo.

5.3 DAISY

Simula la producción de cultivos y dinámica del agua del suelo y nitrógeno bajo diversos sistemas de manejo agrícola (Mueller et al, 1996). Este fue desarrollado como herramienta de manejo de campo así como para propósitos administrativos regionales y ha sido aplicado para distritos, fincas y sitios específicos. DAISY contiene un modelo hidrológico con un submodelo de agua en el suelo, un submodelo de nitrógeno en el suelo, un submodelo de materia orgánica del suelo y un modelo de cultivo con un submodelo de toma de nitrógeno. Las constantes de proporción son modificadas por el contenido de arcilla del suelo, usa un sistema para la descomposición del litter y la biomasa microbiana es una variable dependiente. También, los microorganismos son incluidos en el modelo.

5.4 DNDC (Denitrificación and Descomposición)

Los procesos de denitrificación y descomposición están influenciados por el ambiente del suelo para predecir emisiones de CO_2, N_2O y N_2 de suelos agrícolas (Li et al, 1992a,b; Li 1996). DNDC, contiene 4 submodelos interactuando: clima del suelo, descomposición, denitrificación, y crecimiento de las plantas. El submodelo de crecimiento de las plantas, incluye subrutinas para prácticas de cultivo como fertilización, irrigación, labranza, rotación de cultivos, aplicación de estiércol para simular almacenamiento de materia

orgánica en tierras arables. La adsorción de arcilla, permite especificidad del suelo, la descomposición es de primer orden y la biomasa formada durante la descomposición es una variable dependiente.

5.5 NCSOIL

Simula flujos de nitrógeno y de carbono a través de microbios del suelo y componentes de materia orgánica (Molina, 1996). Este comprende 4 compartimentos: residuos de plantas, biomasa microbiana (Pool I), (Pool II) y materia orgánica estable (Pool III) (Nicolardot et al 1994). Los flujos de carbono y nitrógeno, están interconectados y la estabilidad de la materia orgánica resulta del metabolismo y no de mecanismos de adsorción que serían susceptibles al contenido de arcilla. Además de ^{12}C y ^{14}N, este simula dinámicas de ^{14}C y ^{15}N.

5.6 ROTHC

En éste modelo el movimiento de carbono en suelo aeróbico varía de acuerdo al tipo de suelo, temperatura, humedad y cobertura vegetal (Coleman and Jenkinson, 1996). La dinámica de C y N no están interconectadas en ROTHC y el componente de materia orgánica inerte es cuantificado usando datos de carbono. ROTHC, ha sido usado para calcular entradas de materia orgánica y productividad primaria neta usando materia orgánica del suelo y mediciones isotópicas. Además, utiliza ingreso de datos mensuales y comparte varias ideas básicas del modelo CENTURY.

5.7 SOMM

Está descrito como el submodelo del SPECOM (Single Plant Ecosystem Model) y fue desarrollado para ecosistemas de bosques. Las velocidades de los procesos son regulados por nitrógeno y contenido de ceniza del litter y usa la temperatura y la humedad como variables ambientales (Chertov and Komarov, 1996). Este modelo trata las capas del litter del suelo L, F y H explícitamente. El flujo de carbono de L a H es gobernado por actividad biológica y humificación progresiva del material residual. Este es el único modelo que simula la acumulación de carbono en horizontes orgánicos del suelo.

5.8 ITE (Institute of Terrestrial Ecology – Edinburgh)

Este modelo principalmente simula el ciclaje del nitrógeno en un sistema pastura – suelo y comprende tres submodelos (Thornley and Verberne, 1989). Ellos son: (1) Modelo del animal alimentándose de la pastura, en el cual los flujos de carbono y contenidos de nitrógeno de las heces y orina son susceptibles al contenido de nitrógeno ingestado por la planta; (2) un modelo de crecimiento de los pastos, el cual responde a la luz, temperatura y nitrógeno; y (3) un submodelo de materia orgánica del suelo que responde a heces, orina y descomposición de residuos de plantas. En éste modelo, todas las tasas de descomposición son función de la cantidad de biomasa microbiana y algunos componentes son mineralizados para CO_2 ó NH_3. El modelo ITE, ha sido combinado con un modelo de resistencia al transporte para describir compartimentos de C, N y flujos en un sistema suelo con plantación forestal (Thornley and Cannell, 1992).

5.9 VERBERNE

Simula el balance de agua y nitrógeno en un sistema suelo – pastura con el fin de predecir producción, almacenamiento, lixiviación, mineralización y acumulación de nitrógeno en el suelo (Verberne, 1992; Klein-Gunnewiek, 1996). En éste modelo, el suelo es tratado como un sistema de suelo mineral multicapas y usa tres submodelos: (1) submodelo del agua del suelo, (2) submodelo de la materia orgánica del suelo y (3) submodelo de N en el suelo. Las transformaciones, permiten cinéticas de primer orden con protección física causada por la arcilla del suelo, resultando en biomasa protegida y no protegida y materia orgánica. Así mismo, los residuos de las plantas y la materia orgánica son particionados dentro de tres compartimentos (descomponible, estructural y resistente) y (estabilizado, protegido y no protegido) respectivamente. Este modelo, enfatiza la influencia de la arcilla sobre la protección de los microorganismos y componentes orgánicos del suelo.

5.10 Modelo century en el estudio de la dinámica de la materia orgánica en los usos de suelo de estudio

Para la realización de este estudio fue seleccionado el modelo Century Ecosystem Model –Century 4.0. (Parton et al., 1987), cuya manipulación se hace por medio de una interface con el programa Access y el editor de texto TextPad 4.0. Este modelo fue escogido en función de sus principios simplificados de funcionamiento, características

adaptadas para aplicaciones en regiones de clima tropicales y subtropicales, facilidad en la obtención de datos de entrada y simulación de diferentes escenarios en la escala del tiempo.

Parametrización: Se efectuó una adaptación y análisis de consistencia de los datos a escala local para la utilización del modelo Century con la siguiente información: a) datos meteorológicos (temperatura mínima, máxima y media; precipitación media mensual y evapotranspiración media mensual); b) datos de suelo (contenido de arcilla, arena y limo, contenido de carbono, densidad aparente, profundidad a la que se extrajeron las muestras); c) manejo y uso del suelo (cultivos establecidos, historia del lugar, cantidad de material vegetal adicionado mensualmente al sistema, adición de fertilizantes, calendario agrícola y cosecha)

Simulaciones: el modelo Century fue utilizado para simular la dinámica del C y N del suelo en diferentes usos del suelo. Inicialmente, se ejecutó para estimar las condiciones iniciales de la materia orgánica asumiendo un estado de equilibrio dinámico del suelo sobre vegetación nativa existente. Después de esta etapa, el modelo fue utilizado para simular las variaciones en el stock de carbono y nitrógeno del suelo en función del tiempo de implementación de diferentes usos del suelo

Validación: Los resultados obtenidos en la simulación fueron comparados con los datos medidos en el campo.

Para avalar cuantitativamente el proceso de validación de simulaciones se utilizaron los siguientes test estadísticos: coeficiente de correlación (r), diferencia media entre valores simulados y observados (M), raíz cuadrada del error medio (RMSE), coeficiente de masa residual (CRM) y coeficiente de determinación (CD) descriptos en detalle por Smith et al., 1996 y 1997.

Aunque, originalmente se desarrolló y probó en condiciones de zona templada, es permanentemente actualizado de modo que permite analizar una amplia gama de ecosistemas, incluyendo condiciones tropicales y subtropicales (Rodríguez 2016). El modelo está bien documentado y existen abundantes publicaciones de sus aplicaciones, como es el caso de (FAO 2004) en Cuba y Méjico, (Corbeels et al., 2006) en Brasil, (Stolpe et al., 2008) en Chile, y Tornquist et al., (2009) en Brasil. En Colombia, (Rueda 2011), estudió la dinámica del carbono en la biomasa de bosques del norte de los Andes colombianos y (Rodríguez 2016), encontró que la disminución del stock de carbono es permanente en el tiempo, mientras no se contribuya al ingreso de materia orgánica al suelo en sistemas de pastos y cultivos transitorios en el piedemonte llanero.
Por otra parte, (Piñeiro 2006) mostró que el modelo además de la capacidad para estimar las existencias de carbono, también puede evaluar hipótesis relacionadas al comportamiento del C en diferentes escenarios de uso de la tierra como pasturas, cultivos, bosques y sabanas y para evaluación e diferentes servicios ambientales.

El modelo, como muestra la Figura 4-1, considera inicialmente, datos climáticos del sitio de interés, como precipitación, temperatura y nutrientes presentes en el suelo. Además, considera la producción primaria neta (NPP) según el tipo de vegetación presente, el C vivo, el C de material muerto relacionado con las actividades de labranza y cosecha, el C estructural, metabólico y microbial en la superficie del suelo y en profundidad, las emisiones de CO_2, y tres fracciones de MO identificadas como C activo, C lento y C pasivo, relacionadas con la textura del suelo (Parton *et. al*., 1987).

Para sistemas de pastizales / cultivos y forestales, el modelo CENTURY contempla diferentes submodelos de producción de plantas, a un submodelo común de materia orgánica del suelo. En contraste, el modelo de sabana utiliza los subsistemas de pastizales / cultivos y forestales y permite que los dos subsistemas interactúen a través de efectos de sombreado y de la competencia del nitrógeno. El submodelo de materia orgánica del suelo simula el flujo de C, N, P y S a través de los residuos vegetales y los diferentes reservorios inorgánicos y orgánicos en el suelo (Metherell, *et.al*., 1993).

De acuerdo a la Figura 4-2, el modelo de producción vegetal contempla reservorios para brotes, raíces vivas y material muerto. El potencial de producción máximo de cultivo, no limitado por la temperatura, humedad o estrés por nutrientes, es determinado principalmente por el nivel de radiación fotosintética activa, la tasa máxima de asimilación neta de la fotosíntesis, la eficiencia de conversión de carbohidratos dentro de los componentes de las plantas y la tasa de respiración de mantenimiento (Van Heemst, 1986). De ésta manera, el parámetro para la producción potencial máxima, contempla ambos componentes, genético y ambiental (Metherell, *et.al.*, 1993).

Figura 4-1: Diagrama de flujo para el submodelo de nitrógeno

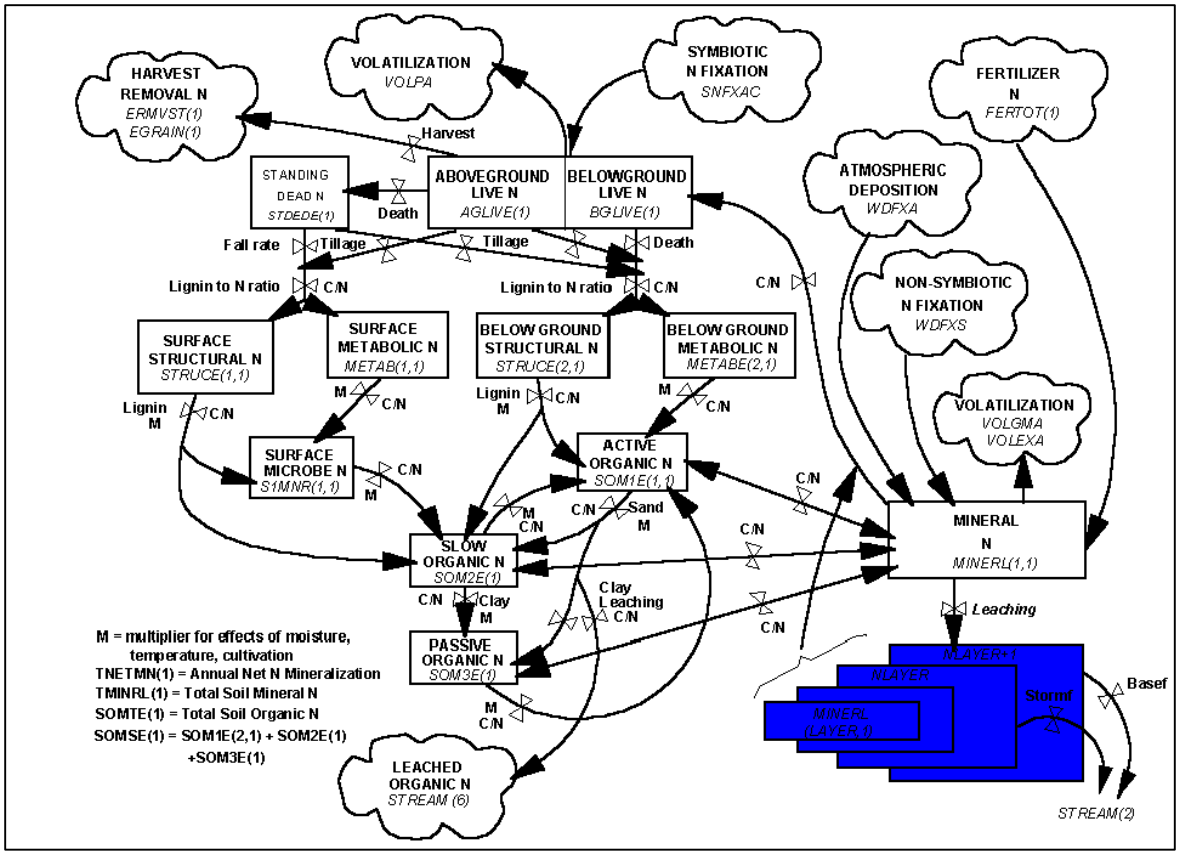
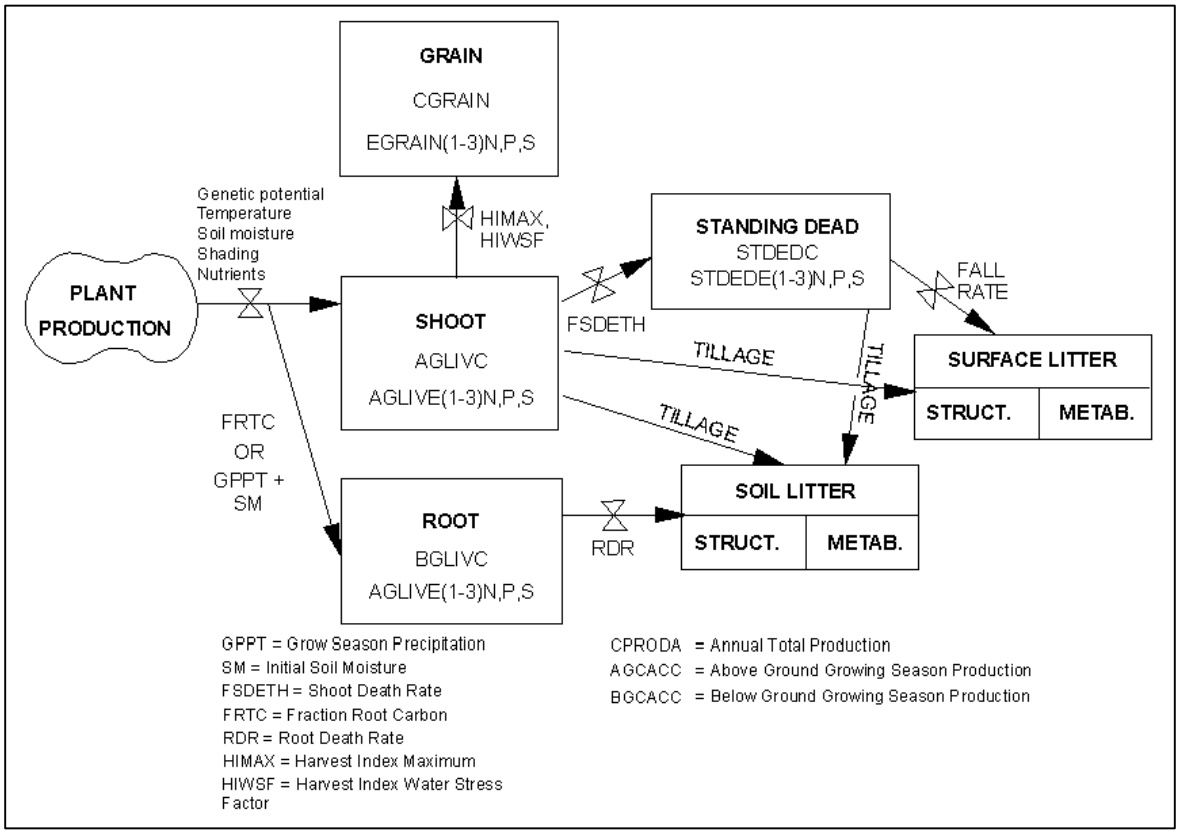


Figura 4-2: Diagrama de flujo para el submodelo Pasto/cultivo



5.11 Calibración de la simulación de los datos de carbono, en diferentes usos de suelos del Piedemonte Amazónico Colombiano

La calibración se hizo mediante la aplicación del modelo de equilibrio para 7000 años, aplicando la información de la librería del modelo Century (File.100), ver Figura 4-3. Para éste proceso, se tomaron los valores de producción neta de biomasa correspondientes a vegetación de bosque Luquillo Amazónico (Tree.100), se consideró un proceso de tala del sistema vegetal (Trem.100) y con los datos de precipitación (Figura 4-4), temperaturas máxima y mínima (Figura 4-5) y de suelo propios de cada uno de los sitios de estudio (Site.100) se procedió a correr el modelo. Por último el módulo List.100, toma el resultado de la simulación (un archivo binario) y extrae las variables como usuarios solicitamos; en nuestras simulaciones las variables de salida fueron: la cantidad de C en la fracción activa de la superficie som1c (1), el C en la fracción activa del suelo som1c (2), C en la fracción lenta del suelo som2ci (1) y C en la fracción pasiva del suelo som3ci (1).

Figura 4-3: El entorno del modelo CENTURY, el cual muestra la relación entre los programas y la estructura de archivos.

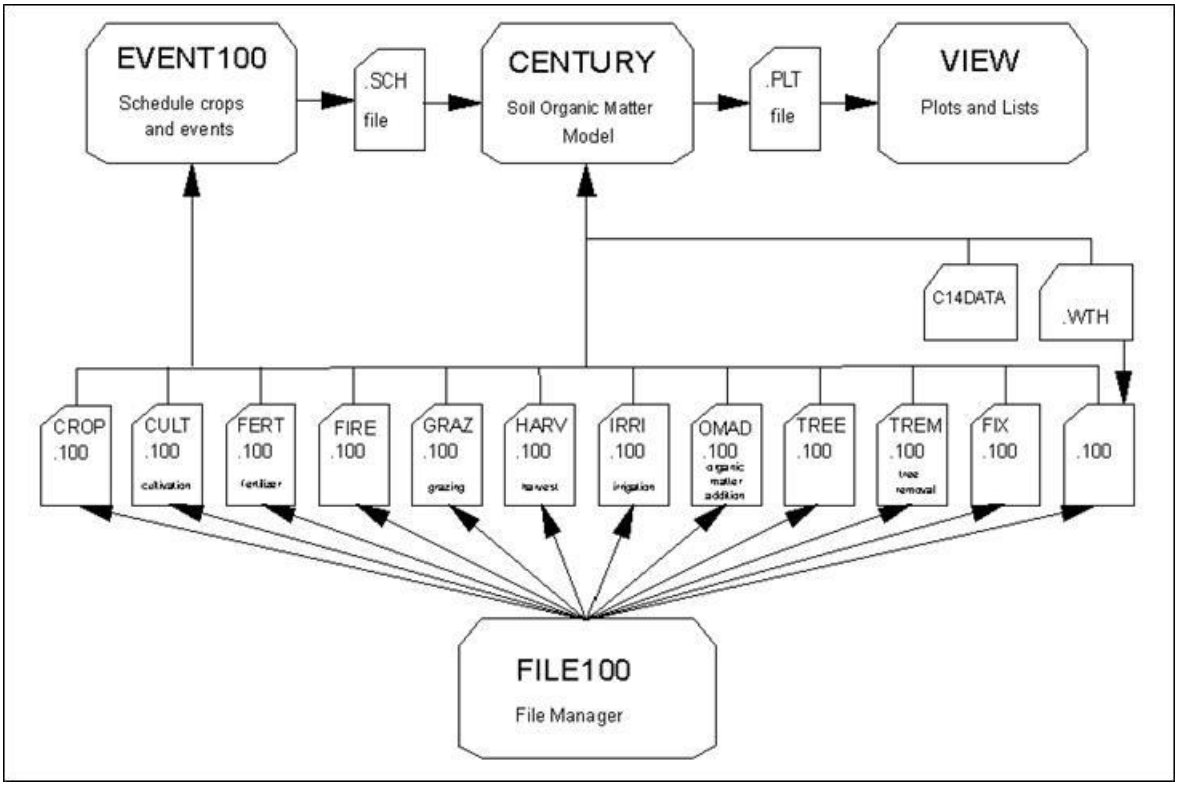


Figura 4-4: Datos de precipitación estación de Macagual (Caquetá) del 2008 al 2010

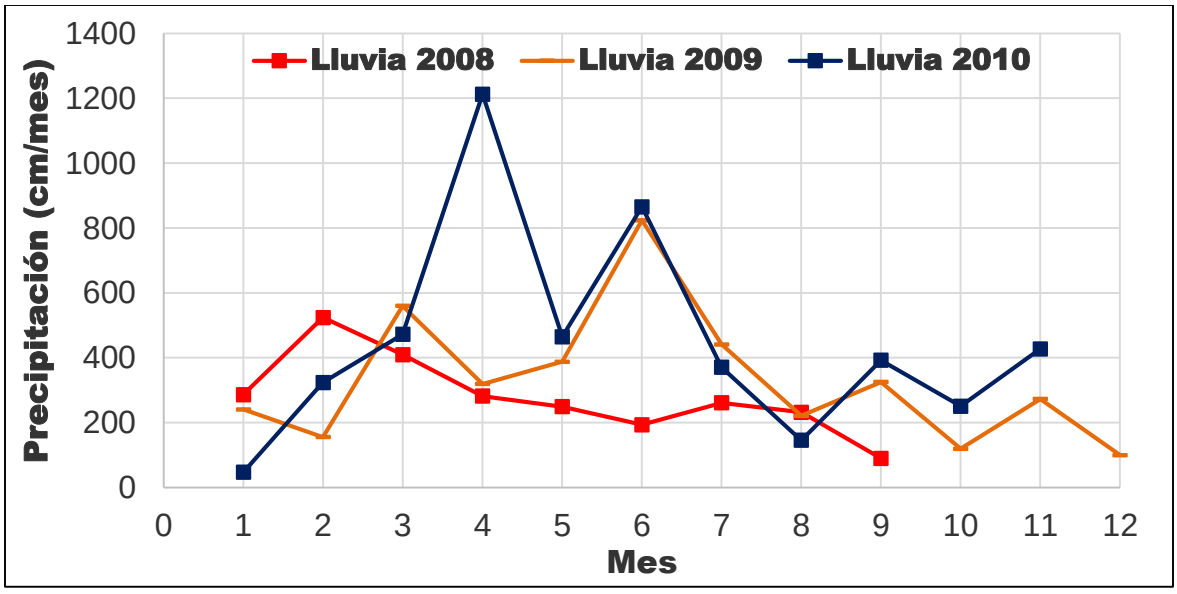
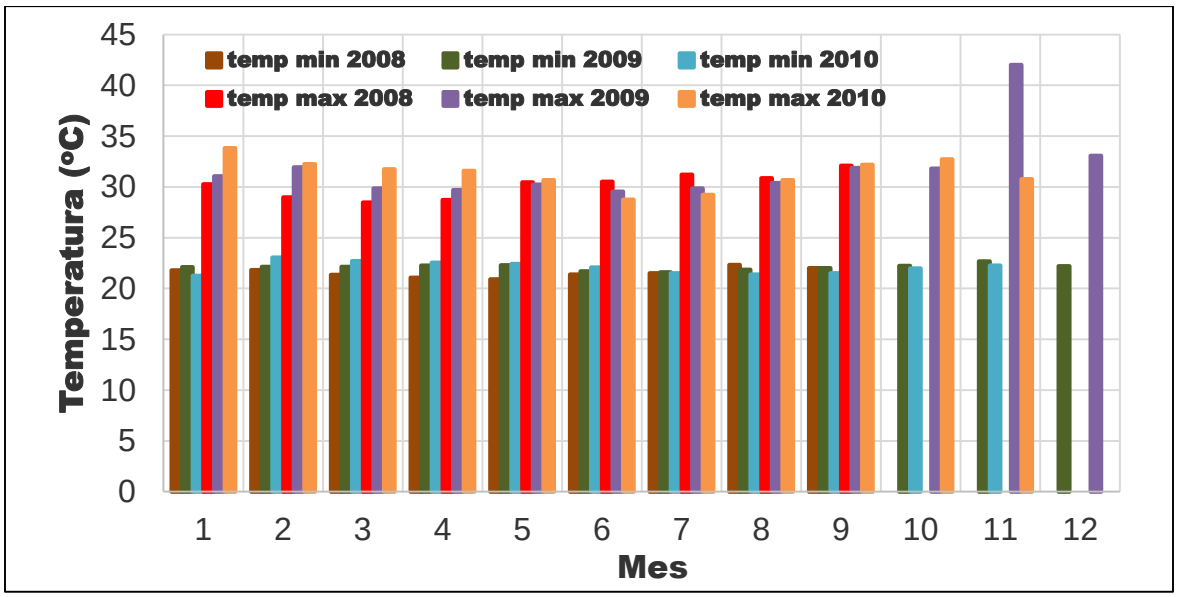


Figura 4-5: Datos de temperaturas máximas y mínimas, estación de Macagual (Caquetá) del 2008 al 2010



Antes de simular en Century los diferentes escenarios propuestos, se hicieron pruebas de calibración del modelo, estableciéndose que los parámetros de densidad aparente, textura del suelo, precipitación y temperatura influyen en los valores de carbono total del suelo, cuando se crearon los archivos para cada sistema de uso (Tabla 4-1). En la Figura 4-6, se da un ejemplo de la programación en el sistema tradicional.

Tabla 4-1. Valores de textura y densidad aparente que se tomaron en cuenta en los sistemas de estudio

SISTEMA	%Arena	%Arcilla	%Limo	Densidad aparente (g/cm^3)
Convencional	21.62	41.83	36.55	1.0657
Silvopastoril	8.47	44.77	46.77	1.1279
Agroforestal	34.58	42.38	33.03	1.0690

Figura 4-6: Archivo de sitio.100 para el sistema Convencional

```
CTR TRADICIONAL
*** Climate parameters
24.08     'PRECIP(1)'
15.54     'PRECIP(2)'
56.00     'PRECIP(3)'
31.92     'PRECIP(4)'
38.80     'PRECIP(5)'
82.36     'PRECIP(6)'
44.13     'PRECIP(7)'
22.09     'PRECIP(8)'
32.52     'PRECIP(9)'
11.96     'PRECIP(10)'
27.27     'PRECIP(11)'
10.00     'PRECIP(12)'
14.56     'PRCSTD(1)'
43.56     'PRCSTD(2)'
26.01     'PRCSTD(3)'
15.88     'PRCSTD(4)'
14.06     'PRCSTD(5)'
15.71     'PRCSTD(6)'
23.39     'PRCSTD(7)'
10.70     'PRCSTD(8)'
5.590     'PRCSTD(9)'
7.760     'PRCSTD(10)'
10.01     'PRCSTD(11)'
7.880     'PRCSTD(12)'
0.00      'PRCSKW(1)'
0.00      'PRCSKW(2)'
0.00      'PRCSKW(3)'
0.00      'PRCSKW(4)'
0.00      'PRCSKW(5)'
0.00      'PRCSKW(6)'
0.00      'PRCSKW(7)'
0.00      'PRCSKW(8)'
0.00      'PRCSKW(9)'
0.00      'PRCSKW(10)'
0.00      'PRCSKW(11)'
0.00      'PRCSKW(12)'
22.12     'TMN2M(1)'
22.13     'TMN2M(2)'
22.14     'TMN2M(3)'
22.25     'TMN2M(4)'
22.29     'TMN2M(5)'
21.69     'TMN2M(6)'
21.61     'TMN2M(7)'
21.87     'TMN2M(8)'
22.03     'TMN2M(9)'
22.25     'TMN2M(10)'
22.69     'TMN2M(11)'
22.21     'TMN2M(12)'
31.06     'TMX2M(1)'
31.94     'TMX2M(2)'
29.84     'TMX2M(3)'
29.70     'TMX2M(4)'
30.22     'TMX2M(5)'
29.53     'TMX2M(6)'
29.85     'TMX2M(7)'
30.40     'TMX2M(8)'
31.88     'TMX2M(9)'
31.81     'TMX2M(10)'
42.01     'TMX2M(11)'
33.06     'TMX2M(12)'
*** Site and control parameters
0.00000   'IVAUTO'
1.00000   'NELEM'
01.19     'SITLAT'
-75.48    'SITLNG'
0.2162    'SAND'
0.3655    'SILT'
0.4183    'CLAY'
1.07      'BULKD'
3         'NLAYER'
3         'NLAYPG'
1.00000   'DRAIN'
0.20000   'BASEF'
0.80000   'STORMF'
1.00000   'SWFLAG'
0.3       'AWILT(1)'
0.3       'AWILT(2)'
0.3       'AWILT(3)'
0.3       'AWILT(4)'
0.3       'AWILT(5)'
0.3       'AWILT(6)'
0.3       'AWILT(7)'
0.3       'AWILT(8)'
0.3       'AWILT(9)'
0.3       'AWILT(10)'
0.4       'AFIEL(1)'
0.4       'AFIEL(2)'
0.4       'AFIEL(3)'
0.4       'AFIEL(4)'
0.4       'AFIEL(5)'
0.4       'AFIEL(6)'
0.4       'AFIEL(7)'
0.4       'AFIEL(8)'
0.4       'AFIEL(9)'
0.4       'AFIEL(10)'
4.5       'PH'
1.00000   'PSLSRB'
20.00000  'SORPMX'

*** External nutrient
input parameters
0.21      'EPNFA(1)'
0.0028    'EPNFA(2)'
-0.92     'EPNFS(1)'
0.028     'EPNFS(2)'
0         'SATMOS(1)'
0         'SATMOS(2)'
0         'SIRRI'
*** Organic matter initial
values
3799      'SOM1CI(1,1)'
0.00000
'SOM1CI(1,2)'
0         'SOM1CI(2,1)'
0.00000
'SOM1CI(2,2)'
1277      'SOM2CI(1)'
0.00000   'SOM2CI(2)'
1107      'SOM3CI(1)'
0.00000   'SOM3CI(2)'
5         'RCES1(1,1)'
0.297     'RCES1(1,2)'
```

Figura 4-6: Archivo de sitio.100 para el sistema Convencional

```
50          'RCES1(1,3)'
10          'RCES1(2,1)'
50          'RCES1(2,2)'
50          'RCES1(2,3)'
17          'RCES2(1)'
117         'RCES2(2)'
117         'RCES2(3)'
7.0         'RCES3(1)'
62.0        'RCES3(2)'
62.0        'RCES3(3)'
100.0       'CLITTR(1,1)'
0.00000     'CLITTR(1,2)'
100.0       'CLITTR(2,1)'
0.00        'CLITTR(2,2)'
0           'RCELIT(1,1)'
0           'RCELIT(1,2)'
0           'RCELIT(1,3)'
66          'RCELIT(2,1)'
0           'RCELIT(2,2)'
0           'RCELIT(2,3)'
25770       'AGLCIS(1)'
0.00000     'AGLCIS(2)'
0.00000     'AGLIVE(1)'
0.00000     'AGLIVE(2)'
0.00000     'AGLIVE(3)'
0.00000     'BGLCIS(1)'
0.00000     'BGLCIS(2)'
4900        'BGLIVE(1)'
210         'BGLIVE(2)'
210         'BGLIVE(3)'
50          'STDCIS(1)'
0.00000     'STDCIS(2)'
0.8         'STDEDE(1)'
0.2         'STDEDE(2)'
0.2         'STDEDE(3)'
*** Forest organic matter initial parameters
0.0         'RLVCIS(1)'
0.00000     'RLVCIS(2)'
0           'RLEAVE(1)'
0           'RLEAVE(2)'
0           'RLEAVE(3)'
0           'FBRCIS(1)'
0.00000     'FBRCIS(2)'
0           'FBRCHE(1)'
0           'FBRCHE(2)'
0           'FBRCHE(3)'
0           'RLWCIS(1)'
0.00000     'RLWCIS(2)'
0           'RLWODE(1)'
0           'RLWODE(2)'
0           'RLWODE(3)'
0           'FRTCIS(1)'
0.00000     'FRTCIS(2)'
0           'FROOTE(1)'
0           'FROOTE(2)'
0           'FROOTE(3)'
0           'CRTCIS(1)'
0.00000     'CRTCIS(2)'
0           'CROOTE(1)'
0           'CROOTE(2)'
0           'CROOTE(3)'
0           'WD1CIS(1)'
0.00000     'WD1CIS(2)'
0           'WD2CIS(1)'
0.00000     'WD2CIS(2)'
0           'WD3CIS(1)'
0.00000     'WD3CIS(2)'
0.30000     'W1LIG'
0.30000     'W2LIG'
0.30000     'W3LIG'

*** Mineral initial parameters
0           'MINERL(1,1)'
0           'MINERL(2,1)'
0           'MINERL(3,1)'
0           'MINERL(4,1)'
0           'MINERL(5,1)'
0           'MINERL(6,1)'
0           'MINERL(7,1)'
0           'MINERL(8,1)'
0           'MINERL(9,1)'
0           'MINERL(10,1)'
0           'MINERL(1,2)'
0           'MINERL(2,2)'
0           'MINERL(3,2)'
0           'MINERL(4,2)'
0           'MINERL(5,2)'
0           'MINERL(6,2)'
0           'MINERL(7,2)'
0           'MINERL(8,2)'
0           'MINERL(9,2)'
```

El tipo de vegetación (con respecto a la máxima producción de biomasa neta al mes – PRDX) condiciona también las cantidades de carbono presentes en cada una de las fracciones de la MO del suelo. En la Tablas 4.2, 4-3 y 4-4, se registran los valores de stock de carbono simulados con un modelo de equilibrio para 7000 años, en vegetación de bosque, considerando los datos de clima y suelo de los sistemas Convencional, Silvopastoril y Agroforestal, los cuales fueron de 59.49, 67.72 y 74.80 g/m^2 respectivamente.

Tabla 4-2. Resultados de la calibración del CENTURY, con un modelo de equilibrio para 7000 años en vegetación de bosque – Sistema Convencional - CTR

Tiempo (Años)	C Superficie MO Activa (g/m^2)	C Suelo MO Activa (g/m^2)	C Suelo MO Lenta (g/m^2)	C Suelo MO Pasiva (g/m^2)	C Total (g/m^2)
2	21,397	82,452	2488,389	1107,965	3700,203
3	29,398	91,138	2320,354	1110,193	3551,083
6998	54,236	150,935	3432,627	2601,863	6239,661
6999	54,257	150,986	3433,953	2602,255	6241,451
7000	54,278	151,037	3435,266	2602,650	6243,231
Promedio	49,324	145,021	3229,786	2524,705	**5948,835**
sd	3,58	4,30	128,26	202,13	258,40
CV (%)	7,25	2,97	3,97	8,01	4,34

Tabla 4-3. Resultados de la calibración del CENTURY, con un modelo de equilibrio para 7000 años en vegetación de bosque – Sistema Silvopastoril – CSP

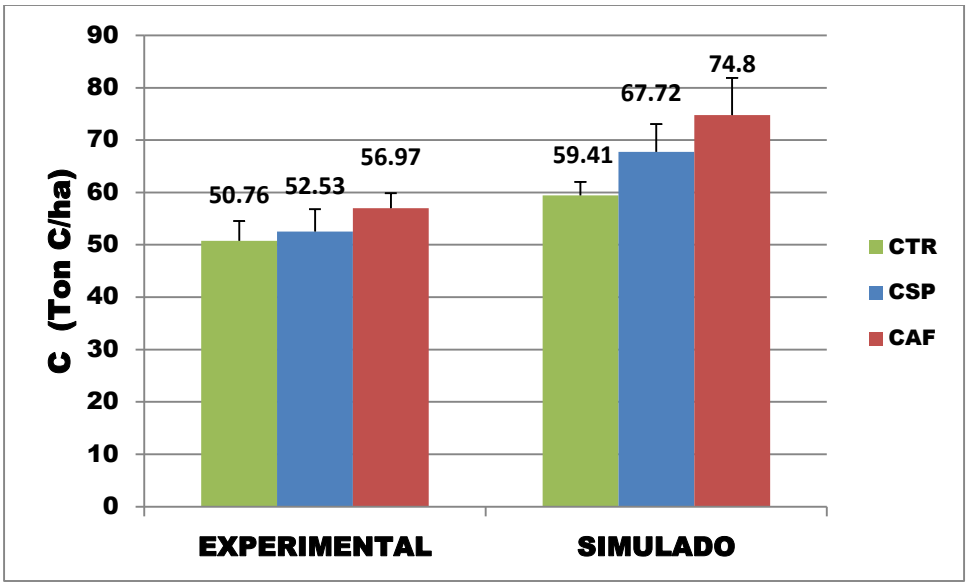
Tiempo (Años)	C Superficie MO Activa (g/m^2)	C Suelo MO Activa (g/m^2)	C Suelo MO Lenta (g/m^2)	C Suelo MO Pasiva (g/m^2)	C Total (g/m^2)
2	21,121	109,434	2694,047	1060,624	3885,226
3	29,315	127,195	2517,947	1063,724	3738,181
6998	55,554	217,592	3859,613	3017,099	7149,858
6999	55,570	217,647	3860,784	3017,564	7151,565
7000	55,585	217,701	3861,932	3018,027	7153,245
Promedio	50,199	207,633	3612,070	2901,593	**6771,494**
sd	3,64	6,51	139,06	276,71	362,05
CV (%)	7,25	3,14	3,85	9,54	5,35

Tabla 4-4. Resultados de la calibración del CENTURY, con un modelo de equilibrio para 7000 años en vegetación de bosque – Sistema Agroforestal– CAF

Tiempo (Años)	C Superficie MO Activa (g/m^2)	C Suelo MO Activa (g/m^2)	C Suelo MO Lenta (g/m^2)	C Suelo MO Pasiva (g/m^2)	C Total (g/m^2)
2	22,362	76,824	2865,650	1081,597	4046,433
3	29,469	83,473	2674,031	1087,521	3874,494
6998	54,744	132,091	3613,413	4120,478	7920,726
6999	54,761	132,129	3614,647	4121,064	7922,601
7000	54,779	132,166	3615,863	4121,652	7924,460
Promedio	49,471	125,972	3368,538	3935,984	**7479,966**
sd	3,72	4,18	144,00	454,59	528,96
CV (%)	7,51	3,32	4,27	11,55	7,07

Cuando comparamos los valores experimentales con los simulados, encontramos que el modelo Century pudo simular correctamente los 3 diferentes tipos de uso de suelo y se mantuvo la misma tendencia que los datos experimentales, donde el sistema convencional es el que almacena menos carbono en el suelo, lo cual contrasta con el sistema agroforestal, el cual demostró nuevamente ser un sistema más amigable con el medio ambiente (Figura 4-4).

Figura 4-4. Almacenamiento de carbono experimental y simulado con el Modelo Century para los 3 sistemas de uso de suelo



Con el fin de avalar cuantitativamente el proceso de validación de simulaciones se utilizaron los test estadísticos descriptos en detalle por Smith et al., 1996 y 1997, obteniéndose los siguientes resultados:

- Coeficiente de correlación (r) = **0.9584 -** Correlación directa positiva y existe alto grado de asociación
- Coeficiente de determinación (CD) = **0.9185** – Dispersión de los valores de la simulación respecto de la media de las observaciones
- Raíz cuadrada del error medio (RMSE)= **14.42 toneladas C/ha** – es el valor de sobreestimación o subestimación de las simulaciones
- Diferencia media entre valores simulados y observados (M)= **0.0182**, una buena simulación genera valores cercanos a cero.

En la figura 4-7, está la creación del archivo para calibrar el modelo en el equilibrio para el sistema convencional y en la Figura 4-8, uno de los archivos del cultivo a utilizar en el modelo, el cual se encuentra en la librería CROP

Figura 4-7: Archivo de CTR.evt para el sistema Convencional

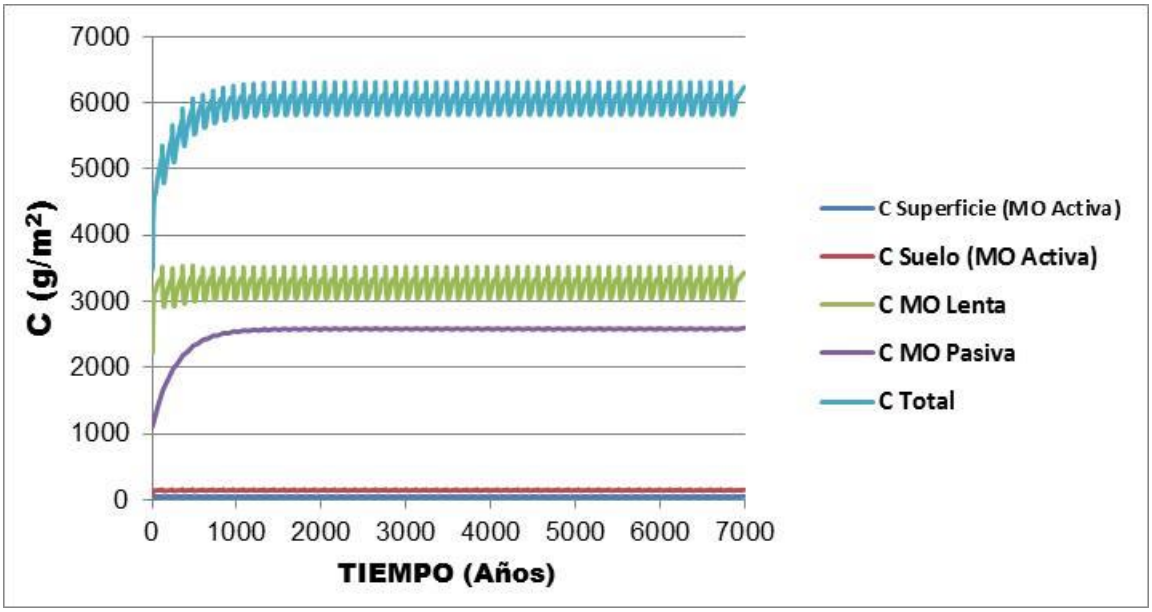
```
1       Starting year
7000    Last year
erav.100  Site file name
0       Labeling year
-1      Labeling year
-1.00   Microcosm
-1      CO2 Systems
2       Initial system
        Initial crop
LUQ     Initial tree
120  1 TREM CLEARCUT
240  1 TREM CLEARCUT
360  1 TREM CLEARCUT
480  1 TREM CLEARCUT
600  1 TREM CLEARCUT
720  1 TREM CLEARCUT
840  1 TREM CLEARCUT
960  1 TREM CLEARCUT
1080 1 TREM CLEARCUT
1200 1 TREM CLEARCUT
1320 1 TREM CLEARCUT
1440 1 TREM CLEARCUT
1560 1 TREM CLEARCUT
1680 1 TREM CLEARCUT
1800 1 TREM CLEARCUT
1920 1 TREM CLEARCUT
2040 1 TREM CLEARCUT
2160 1 TREM CLEARCUT
2280 1 TREM CLEARCUT
2400 1 TREM CLEARCUT
2520 1 TREM CLEARCUT
2640 1 TREM CLEARCUT
2760 1 TREM CLEARCUT
2880 1 TREM CLEARCUT
3000 1 TREM CLEARCUT
3120 1 TREM CLEARCUT
3240 1 TREM CLEARCUT
3360 1 TREM CLEARCUT
3480 1 TREM CLEARCUT
3600 1 TREM CLEARCUT
3720 1 TREM CLEARCUT
3840 1 TREM CLEARCUT
3960 1 TREM CLEARCUT
4080 1 TREM CLEARCUT
4200 1 TREM CLEARCUT
4320 1 TREM CLEARCUT
4440 1 TREM CLEARCUT
4560 1 TREM CLEARCUT
4680 1 TREM CLEARCUT
4800 1 TREM CLEARCUT
4920 1 TREM CLEARCUT
5040 1 TREM CLEARCUT
5160 1 TREM CLEARCUT
5280 1 TREM CLEARCUT
5400 1 TREM CLEARCUT
5520 1 TREM CLEARCUT
5640 1 TREM CLEARCUT
5760 1 TREM CLEARCUT
5880 1 TREM CLEARCUT
6000 1 TREM CLEARCUT
6120 1 TREM CLEARCUT
6240 1 TREM CLEARCUT
6360 1 TREM CLEARCUT
6480 1 TREM CLEARCUT
6600 1 TREM CLEARCUT
6720 1 TREM CLEARCUT
6840 1 TREM CLEARCUT

Year Month Option
1       Block 1
7000    Last year
1       Repeats # years
1       Output starting year
1       Output month
1.0     Output interval
M       Weather choice
1  1 TREE LUQ
1 TFST 12 TLST
-999 -999 X
```

Figura 4-8: Archivo de la librería CROP para el cultivo TKNZ2 (Pasto amazónico) usado en la simulación

```
TKNZ2    Amazon Pasture
800          'PRDX(1)'
30.00000     'PPDF(1)'
45.00000     'PPDF(2)'
1.00000      'PPDF(3)'
2.50000      'PPDF(4)'
1.00000      'BIOFLG'
60.00000     'BIOK5'
0          'PLTMRF'
150          'FULCAN'
0.00000      'FRTC(1)'
0.00000      'FRTC(2)'
0.00000      'FRTC(3)'
400.00000    'BIOMAX'
30         'PRAMN(1,1)'
390.00000    'PRAMN(2,1)'
340.00000    'PRAMN(3,1)'
90         'PRAMN(1,2)'
390.00000    'PRAMN(2,2)'
340.00000    'PRAMN(3,2)'
35         'PRAMX(1,1)'
440.00000    'PRAMX(2,1)'
440.00000    'PRAMX(3,1)'
95         'PRAMX(1,2)'
440.00000    'PRAMX(2,2)'
440.00000    'PRAMX(3,2)'
50         'PRBMN(1,1)'
390.00000    'PRBMN(2,1)'
340.00000    'PRBMN(3,1)'
0.00000    'PRBMN(1,2)'
0.00000    'PRBMN(2,2)'
0.00000    'PRBMN(3,2)'
55         'PRBMX(1,1)'
420.00000    'PRBMX(2,1)'
420.00000    'PRBMX(3,1)'
0.00000    'PRBMX(1,2)'
0.00000    'PRBMX(2,2)'
0.00000    'PRBMX(3,2)'
0.02000    'FLIGNI(1,1)'
0.012      'FLIGNI(2,1)'
0.26000    'FLIGNI(1,2)'
-0.00150   'FLIGNI(2,2)'
0.00000    'HIMAX'
0.00000    'HIWSF'
0.00000    'HIMON(1)'
0.00000    'HIMON(2)'
0          'EFRGRN(1)'
0          'EFRGRN(2)'
0          'EFRGRN(3)'
0.15       'VLOSSP'
0.20000    'FSDETH(1)'
0.95000    'FSDETH(2)'
0.20000    'FSDETH(3)'
150.00000  'FSDETH(4)'
0.15000    'FALLRT'
0.05000    'RDR'
2.00000    'RTDTMP'
0          'CRPRTF(1)'
0.00000    'CRPRTF(2)'
0.00000    'CRPRTF(3)'
0.05       'SNFXMX(1)'
-15.000    'DEL13C'
1.20000    'CO2IPR'
0.80000    'CO2ITR'
1.20000    'CO2ICE(1,1,1)'
1.00000    'CO2ICE(1,1,2)'
1.00000    'CO2ICE(1,1,3)'
1.20000    'CO2ICE(1,2,1)'
1.00000    'CO2ICE(1,2,2)'
1.00000    'CO2ICE(1,2,3)'
1.00000    'CO2IRS(1)'
```

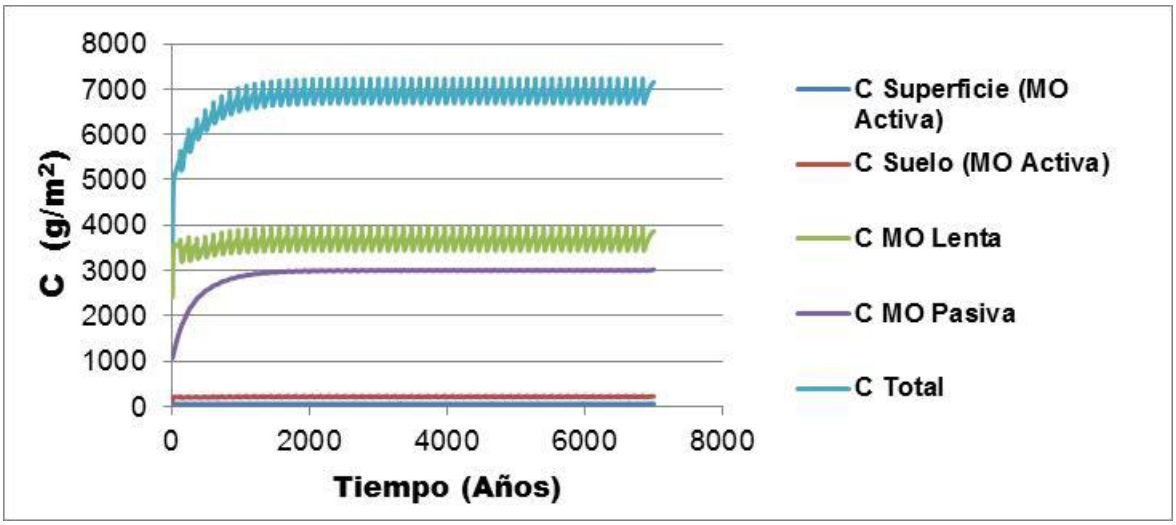
El modelo century, simuló los valores de equilibrio de carbono orgánico total y los compartimientos de carbono en la materia orgánica activa, lenta y pasiva), en un horizonte de tiempo de 7000 años para los sistemas convencional (Figura 4-9), silvopastoril (Figura 4-10) y agroforestal (Figura 4-11). Los valores iniciales del almacenamiento de carbono total y C pasivo incrementaron, mientras que la fracción lenta y activa permanecieron constante.

Figura 4-9 Modelización de almacenamiento de carbono orgánico total y carbono orgánico, en los compartimientos de materia orgánica activa, lenta y pasiva, en el sistema convencional (0 a 30 cm)



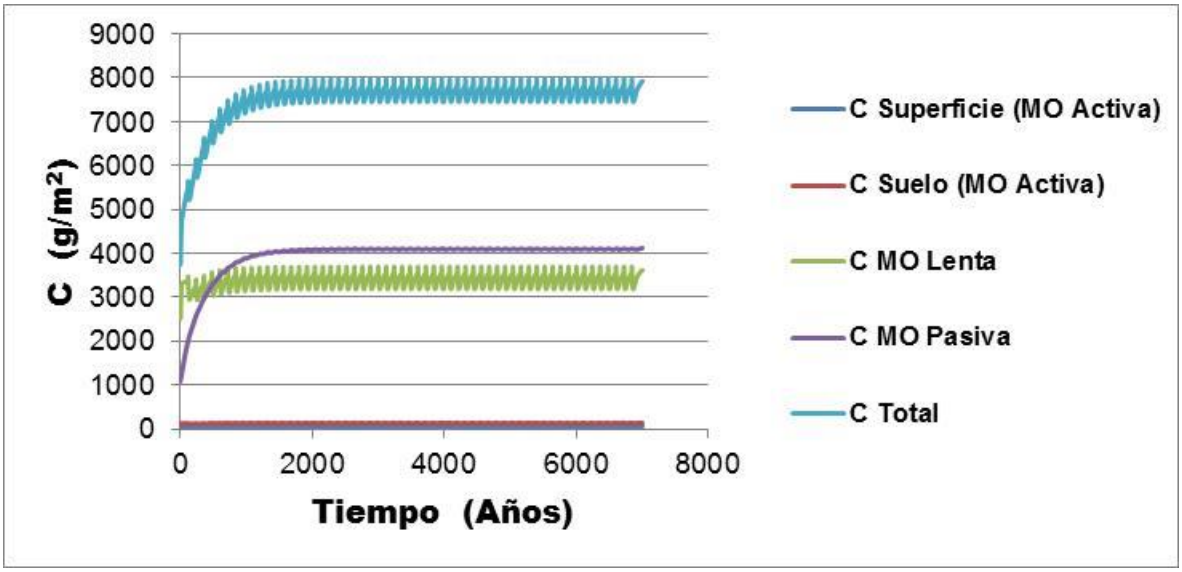
Después de alcanzar el equilibrio se encontraron valores de carbono total, activo y pasivo de 59.49, 1.45 y 25.25 ton C/ha respectivamente. Los valores de carbono pasivo son más altos para suelos tropicales que los que simula century (L.F.Carvalho Leite et al, 2004).

Figura 4-10 Modelización de almacenamiento de carbono orgánico total y carbono orgánico, en los compartimientos de materia orgánica activa, lenta y pasiva, en el sistema silvopastoril (0 a 30 cm)



Después de alcanzar el equilibrio se encontraron valores de carbono total, activo y pasivo de 67.71, 2.08 y 29.02 ton C/ha respectivamente.

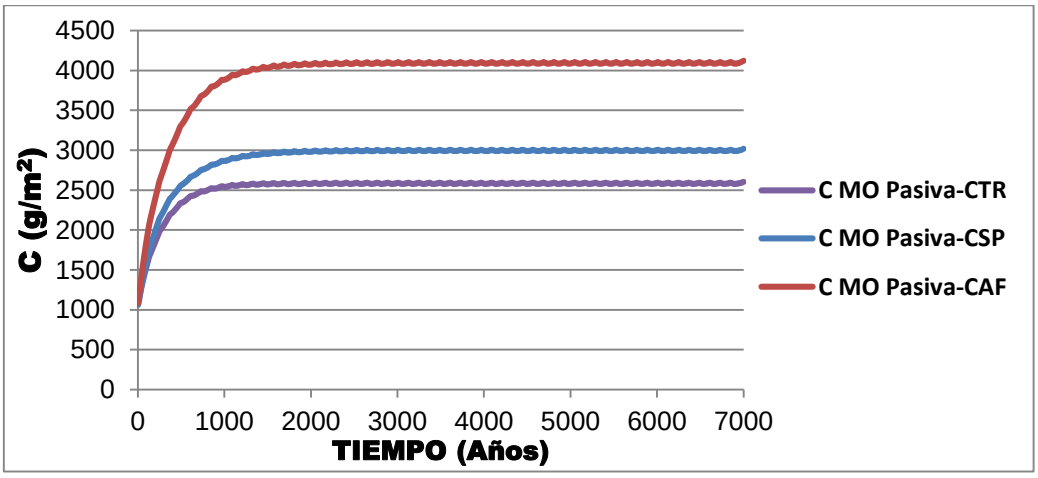
Figura 4-11 Modelización de almacenamiento de carbono orgánico total y carbono orgánico, en los compartimientos de materia orgánica activa, lenta y pasiva, en el sistema agroforestal (0 a 30 cm)



Después de alcanzar el equilibrio se encontraron valores de carbono total, activo y pasivo de 74.80, 1.26 y 39.36 ton C/ha respectivamente.

Los mayores niveles de materia orgánica pasiva se establecieron para el sistema agroforestal (Figura 4-12) y en el compartimiento de la materia orgánica pasiva, fue donde se observaron las mayores diferencias entre los tres sistemas de uso de suelo.

Figura 4-12 Modelización de materia orgánica pasiva, en los tres sistemas de uso de suelo (0 a 30 cm)



5.12 Simulación de escenarios, en diferentes usos de suelos del Piedemonte Amazónico Colombiano

Se simularon escenarios en los cuales se continúan con prácticas de manejo del suelo como alta intensidad de pastoreo, ausencia de pastoreo, métodos de siembra, uso de fertilizantes, quema o no quema, plantaciones de especies vegetales. Lo anterior con el fin de determinar las prácticas de manejo que mejoran el sistema tradicional y establecer el mejor sistema de uso en las condiciones de suelo que se tienen actualmente.

En la Figura 4-13, se encuentra un ejemplo de programación de escenario para alto pastoreo.

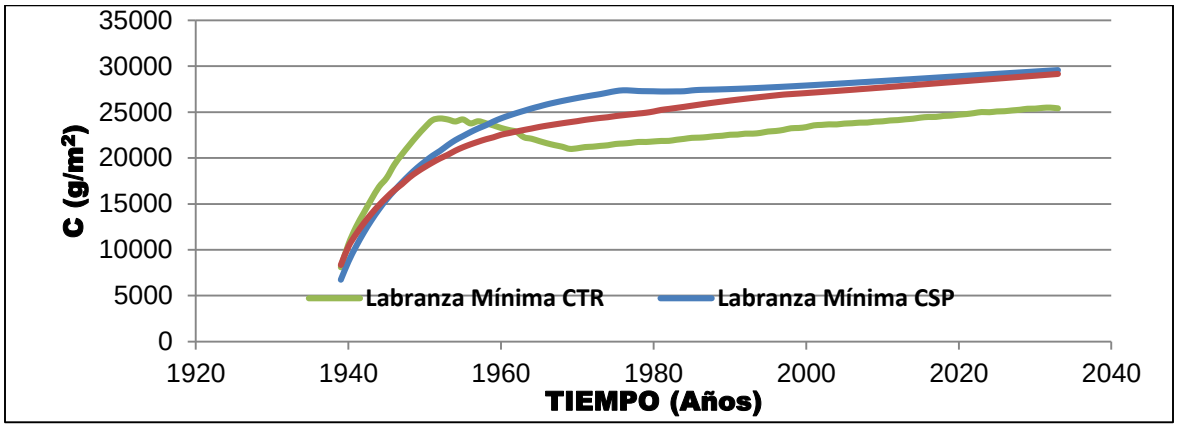
Figura 4-13. Archivo de CTR.sch para simular alto pastores en el sistema Convencional

```
1938        Starting year
2038        Last year
ERAV.100          Site file name
0          Labeling type
-1         Labeling year
-1.00       Microcosm
-1          CO2 Systems
2          Initial system
           Initial crop
LUQ         Initial tree

Year Month Option
1          Block #   pasture
2038        Last year
1          Repeats # years
1938          Output starting year
1          Output month
1.000       Output interval
M          Weather choice
  1    1 CROP
TKNZ2
  1    1 FRST
  1    1 GRAZ
GH
  1   12 LAST
-999 -999 X
```

5.12.1 Escenarios de métodos de siembra en el Sistema Tradicional

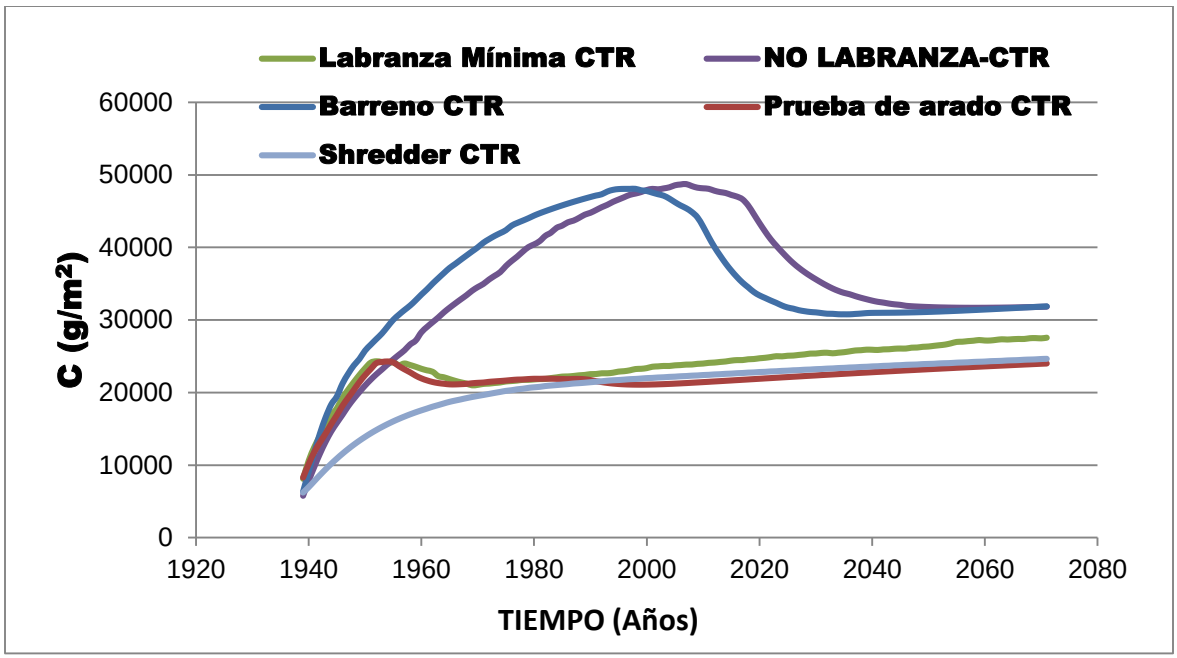
En la Figura 4-14, se encuentran los resultados de la simulación de labranza mínima para cada uno de los sistemas, donde el sistema convencional presenta los valores más bajos de carbono total para un periodo comprendido entre 1938 y 2040 (236.68 ton C/ha), mientras en el agroforestal se encontró 298.59 ton C/ha.

Figura 4-14. Simulación de labranza mínima para los 3 sistemas de uso de suelo en un periodo de año de 1938 a 2033



Debido a lo anterior, se simuló para éste sistema diferentes tipos de siembra, con el fin de establecer la mejor opción para evitar disminuciones en el almacenamiento de carbono (Figura 4-15). Se logró establecer que el uso de procesos como Shredder y arados disminuyen el carbono total a niveles de 207.84 ton C/ha, en contraste el uso del barreno o la realización de una labranza mínima permiten conservar 351.64 ton C/ha, en el sistema en un periodo de 1938 a 2070.

Figura 4-15. Simulación de diferentes tipos de siembra para los 3 sistemas de uso de suelo en un periodo de año de 1938 a 2070



5.12.2 Escenarios de pastoreo en los sistemas de uso de estudio

Los pastizales que son sometidos a pastoreo intensivo, tienen efectos sobre la tasa de infiltración, la densidad aparente y la pérdida de carbono orgánico. Así mismo, pérdida de especies preferidas, aumento de malezas, en el suelo signos de erosión hídrica, compactación (baja infiltración), pérdida de nutrientes (menor productividad) y aumento del suelo desnudo (mayor superficie disponible para ser erosionada), (Celdran, D,, 2015).

Para el sistema Convencional se observa que aun en ausencia de pastoreo presenta niveles de carbono de 235.03 ton C/ha, ver figura 4-15 y cuando éste sistema es sometido a una alta intensidad de pastoreo exhibe niveles de carbono de 239.10 ton C/ha (Figura 4-16).

Figura 4-15. Simulación de la ausencia de pastoreo para los 3 sistemas de uso de suelo en un periodo de año de 1938 a 2070

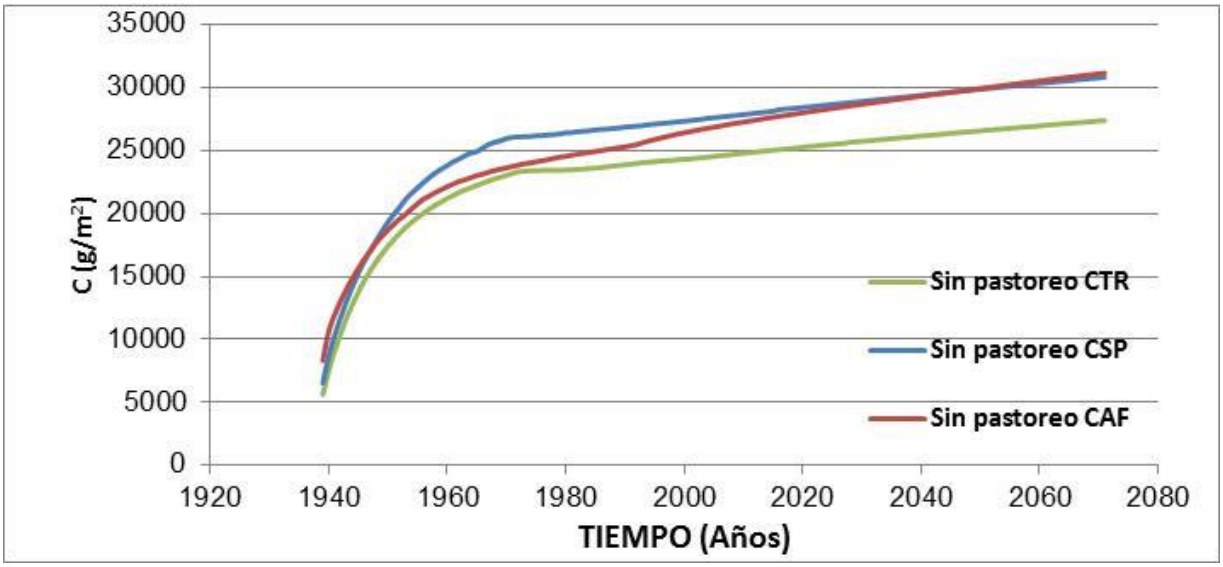
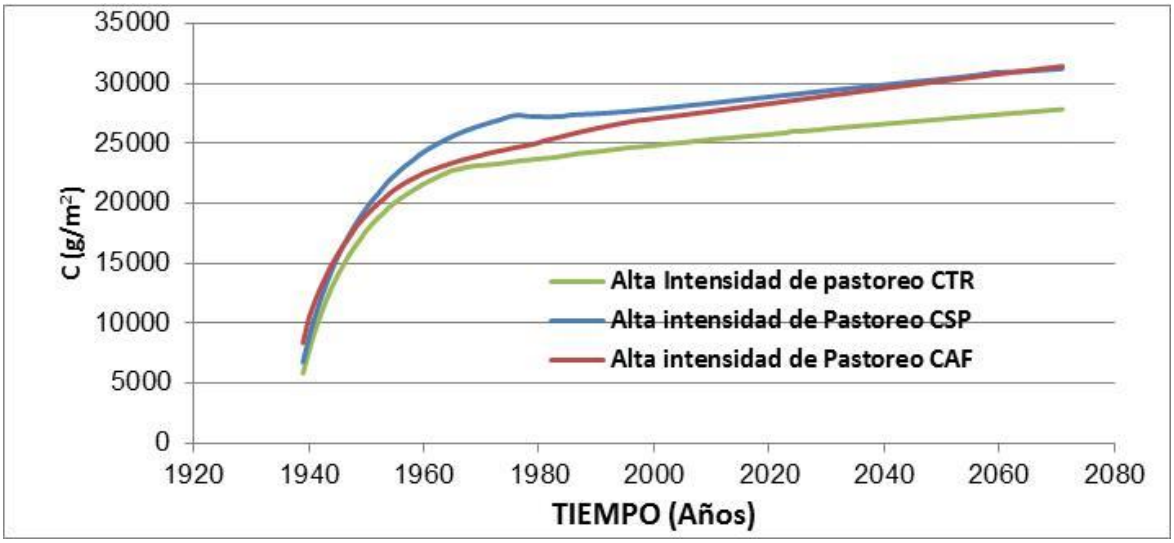


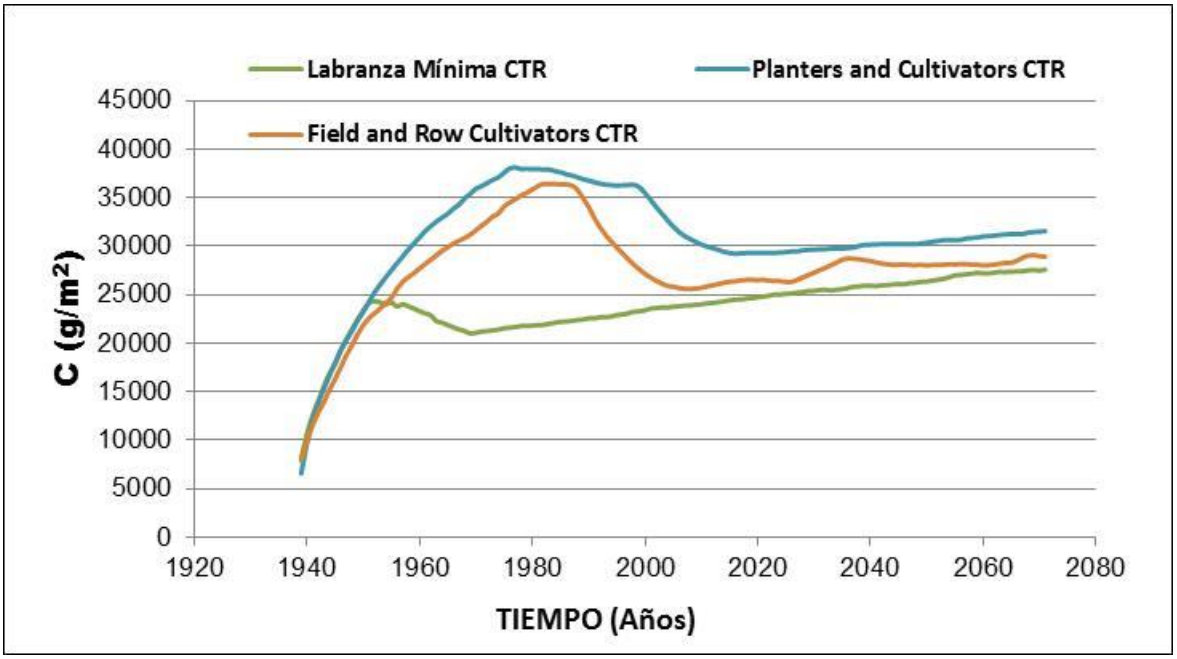
Figura 4-16. Simulación de alta intensidad de pastoreo para los 3 sistemas de uso de suelo en un periodo de año de 1938 a 2070



5.12.3 Escenarios de implementación de plantaciones y cultivos en el sistema convencional

El almacenamiento de carbono cuando se introducen prácticas de plantar y cultivar permite el incremento del carbono total de 302.26 ton C/ha vs 236.68 Ton C/ha del sistema de monocultivo de pastura.

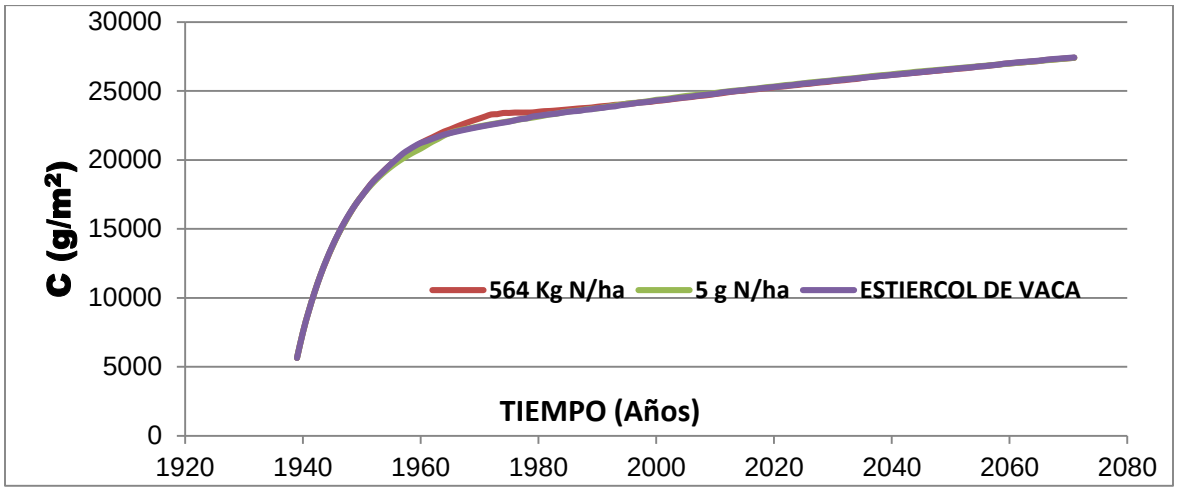
Figura 4-17. Simulación de prácticas de plantaciones y cultivos para el sistema tradicional en un periodo de año de 1938 a 2070



5.12.4 Escenarios de adición de fertilizantes en el sistema convencional

Cuando se realizó la modelización empleando diferentes tipos de fertilizantes, no se observaron diferencias significativas al sistema (Figura 4-18).

Figura 4-18. Simulación de adición de materia orgánica y fertilizantes para el sistema tradicional en un periodo de año de 1938 a 2070



Finalmente, se corrobora, la hipótesis acerca que el cambio del bosque nativo por otro tipo de coberturas vegetales, altera la dinámica de la materia orgánica del suelo. Es importante resaltar que con el Modelo Century, se confirma el gran potencial de los sistemas de estudio para almacenar carbono en el futuro,

6. Conclusiones y recomendaciones

1. Las pasturas, exhibieron los menores valores promedio de almacenamiento de carbono en el suelo de 50.76 ton C/ha mientras en los sistemas silvopastoriles y agroforestales se encontraron niveles de 52,53 y 56.97 ton C/ha respectivamente. Por otra parte en la biomasa aérea, los niveles hallados fueron de 108.04, 48,80 y 25,77 Mg C/ha para los sistemas agroforestal, silvopastoril y convencional respectivamente. Los máximos valores se deben a sistemas que proveen materia orgánica de lenta descomposición y mayores contenidos de agregados biogénicos y de raíces.
2. Las curvas de calibración en NIR, se obtuvieron usando la totalidad del espectro y arrojaron coeficientes de determinación (RSQ) cercanos a uno y errores estándar (SEC) y (SECV) de prácticamente cero. Así mismo, para el nitrógeno, carbono, ^{13}C y ^{15}N, se encontraron valores de desviación residual predictiva (RPD) de 3.32, 5.02, 3.88 y 3.24 respectivamente. De ésta manera al establecerse RPD superiores a 3.0, se garantiza la predicción de la concentración de las muestras desconocidas.
3. Los sistemas estudiados reflejaron señales δ ^{13}C en el rango de -19 ‰ a -26 ‰, propia de plantas C3 ó bosques. Aunque el sistema convencional posee pasturas degradadas, su señal isotópica es proveniente del bosque que estuvo hace 80 años. Así mismo éste sistema, presenta las mayores pérdidas de nitrógeno, con valores de δ 15N de 9,19 ‰, mientras el sistema agroforestal exhibe un nivel de $\delta^{15}N$ de 7,30 ‰.
4. El Modelo Century confirmó que el sistema agroforestal por las condiciones que presenta acumula los mayores niveles de carbono, siendo una alternativa tecnológica y productiva para mejorar las condiciones ambientales y el nivel de vida de los productores del campo, debido al uso eficaz del laboreo, aprovechamiento de los recursos y el mejoramiento de la circulación de nutrientes en el suelo. La validación que se hizo en la parametrización da confianza en las simulaciones por los valores estadísticos encontrados: r=0.9584, CD= 0.8185, RMSE=14.42 toneladas C/ha y M=0.0182.

Bibliografía

Anderson, J.M.; Ingram, J.S. 1993. Tropical Soil Biology and Fertility: A Handbook of Methods. CAB International, Wallingford, UK. 256 pp.Angers, D.A. Caron, J., 1998. Plant – induced changes in soil structure: processes and feedbacks. Biogeochemistry, 45, 55 – 72

Arnauld de Sartre X, Oszwald J, Ramirez B, Rodriguez G, Velazquez J, Sebille P, Lavelle P (2011) Caractéristiques socio-économiques d'une intégration régionale en Amazonie colombienne (re´gion de Florencia, Caqueta). Caravelle. Cahiers du monde hispanique et luso-bre´silien, 96:91–110

Arocena, J.M., Opio, C., 2003. Prescribed fire-induced changes in properties of sub-boreal forest soils. Geoderma, 45, 319 – 329

Barros, A. J. M., Santos, J. C. O., Prasad, S., Leite, V. D.,Souza, A. G.,Soledade, L. E.B., Duarte, M. S. B., dos Santos, V. D. 2006. Thermal decomposition study of sewage sludge and of organic waste used in the sorption of metals, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 83, 2, 291-295

Blanco-Canqui, H., Lal, R., 2004. Mechanisms of carbon sequestration in soil aggregates. Crit. Rev. Plant Sci.23, 481–504.

Brown, G.G.; Barois, I.; Lavelle, P. 2000. Regulation of soil organic matterdynamics and microbial activity in the drilosphere and the role of interactions with other edaphic functional domains. Eur.J.Soil.Biol. 36, 177 - 198

Byron, R.N. y Arnold, J.E.M. 1999. What for the people of the tropical forests?, World Development 27 (5): 789-805.

Bossuyt H.; Six J.& Hendrix, P.F. 2005. Protection of soil carbon by micro aggregates within earthworm casts. Soil Bilogy & Biochemistry, 37, 251-258

Bossuyt H.; Six J.& Hendrix, P.F. 2006. Interactive effects of functionally different earthworm species on aggregation and incorporation and decomposition of newly added residue carbon. Geoderma, 130, 14-25

Buyanovsky, G.A., Aslam, M., Wagner, G.H., 1994. Carbon turnover in soil physical fractions. Soil Sci. Soc. Am. J. 58, 1167-1173.

Caravaca, F., Lax, A. Albaladejo, J. 2001. Soil aggregate stability and organic matter in clay and fine silt fractions in urban refuse-amended semiarid soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 65, 1235-1238.

Carvajal, A.F.; Feijoo A.; Quintero, H.; Rondón, M.A. 2009. Carbono orgánico del suelo en diferentes usos del terreno de paisajes Andinos Colombianos, Rev.Cienc.Suelo.Nutr. 9(3):222-235

Castillo F.; Amézquita C., E.; Mueller-Samann, K. 2000. La turbidimetría una metodología promisoria para caracterizar la estabilidad estructural de los suelos – Turbidimetry a promising method to characterize the structural stability of soils. Suelos Ecuatoriales. 30 (2): 152 -156

Cerri, C., Feller, C., Balesdent, J., Victoria R & Plenecassagne, A 1985. Application du traçage isotopique naturel au à l'étude de la dynamique de la matière organique dans les sols. C.R. Acad. Sci. Paris, 300, 423-428.

Cerri, C., Volkoff, B & Andreux, F. 1991. Nature and behavior of organic matter in soils under natural forest, and after deforestation, burning and cultivation, near Manaus. Forest Ecology and Management, 38, 247-257.

Cerri, C. E. P., Paustian, K., Bernoux, M., Victoria, R. L., Melillo, J. M. & Cerri, C. C. 2004. Modeling changes in soil organic matter in Amazon forest to pasture conversion with the Century model. Global Change Biology, 10, 815-832.

Chan, K.Y.; Heenan, D.P., 1999. Lime – induced loss of soil organic carbon and effect on aggregate stability. Soil.Sci.Soc.Am.J. 63, 1841 – 1844

Chaney, K, Swift, R. S., 1984. The influence of organic matter on aggregate stability in some British soils. Journal of Soil Science 35, 223-230.

Chauvel, A., Grimaldi, M., Barros, E., Blanchart, E., Desjardins, T., Sarrazin, M. & Lavelle , P. 1999. Pasture degradation by an Amazonian earthworm. Nature, 389, 32-33.

Clough, A.; Skjemstad, J.O. 2000. Physical and chemical protection of soil organic carbon in three agricultural soils with different contents of calcium carbonate. Aust.J.Res. 38, 1005 - 1016

Cox P.M. Betts R.A., Jones C.D., Spall S.A., Totterdell I.J.; 2000. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. Nature 408, 184 – 187

De Gryze, S.; Six J.&Merckx, R.2006. Quantifying water-stable soil aggregate turnover and its implication for soil organic matter dynamics in a model study. European Journal of Soil Science, 57, 693-707

Denef, K., Six, J., Paustian, K., Merckx, R., 2001.Importance of macroaggregate dynamics in maintaining soil carbon stabilization. Soil Biol. Biochem. 33, 2145–2153.

Desjardins, T., Barros, E., Sarrazin, M., Girardin, C. & A., M. 2004. Effect of forest conversion to pasture on soil carbon content and dynamics in Brazilian Amazonia. Agriculture, Agrosystems and Environment, 103, 365-373.

Dignac, M.F., Bahri, H., Rumpel, C., Rasse, D.P., Bardoux, G., Balesdent, J.,Girardin, C., Chenu, C., Mariotti, A.2005. Carbon-13 natural abundance as a tool to study the dynamics of lignin monomers in soil: an appraisal at the Closeaux experimental field (France), Geoderma, 128, 3-17.

Dixon R.K.; Brown S.; Houghton R.A., Solomon, A.M., Trexler M.C.; Wisniewski J. 1994. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. Science 263: 185-190

Elliott, E.T., Coleman, D.C., 1988. Let the soil work forus. In: Clarholm, M., Bergstro¨m, L. (Eds.), Ecology of Arable Land. Perspectives and Challenges. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 23–32.

FAO, 2007. Situación de los bosques del mundo. FAO, Roma

Don A.; Steinberg, B.; Pritsch, K.; Joschko M.; Gleixner G.;et al 2008. Organic Carbon sequestration in earthworm burrows. Soil Bilogy & Biochemistry, 40, 1803-1812

Ferreira, O.I., Rondon, M.A., Hurtado, M.P., 2008. Flujos de gases de efecto invernadero del sistema agroforestal Quesungual, sistema de tala y quema y del bosque secundario, en el sur de Lempira,Honduras. TATASCAN – Revista Técnico Científica de la Escuela Nacional de Ciencias Forestales, 20(2): 98-111

Field C.B.; Behrenfeld M.J.; Randerson J.; Falkowski. 1998. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components. Science 281: 237-240

Fisher, M. J., Rao, I. M., Ayarza, M. A., Lascano, C. E., Sanz, J. I., Thomas, R. J. & Vera, R. R. 1994. Carbon storage by introduced deep-rooted grasses in the south-American savannas. Nature, 371, 236-238.

Foley, J. A., Asner, G. P., Costa, M. H., Coe, M. T., Defries, R., Gibbs, H. K., Howard, E. A., Olson, S., Patz, J., Ramankutty, N. & Snyder, P. 2007. Amazonia revealed: forest degradation and loss of ecosystem goods and services in the Amazon Basin. Frontiers in Ecology and the Environment, 5, 25-32.

Follett, R.F., Stewart, B.A., 1985. Soil Erosion and Crop Productivity. American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin, USA. 1985; p. 533.

Fonte, S.J.; Yeboah, E.; Ofori, P.; Quansah, G.W.; Vanlauwe, B.; Six, J. 2009. Fertilizer and residue Quality effects on organic matter stabilization in soil aggregates. Soil Bilogy & Biochemistry, 73 (3), 961-966

Fonte, S.J.; Kong, A.YY.; Van Kessel C.; Hendrix P.F.; Six, J. Influence of earthworm activity on aggregate-associated carbon and nitrogen dynamics differs with agroecosystem management. 2007. Soil Bilogy & Biochemistry,39, 1014-1022

García-Oliva, F.; Stanford Jr.; Kelly, E. Geoderma, 88, 1 - 12

Gash J.H.C.; Huntingford C.; Marengo J.A.; Betts R.A.; Cox P.M.; Fisch G.; Fu R.; Gandu A.W.; Harris P.P.; Machado L.A.T.; Von Randow C.; Silva Dias M.A. 2004. Amazonian Climate:results and future research. Theor Appl Climatol (LBA Special Issue), 78: 187-193

Gentile, R., Vanlauwe, B, Chivenge, P., Six, J. 2011. Trade-offs between the short- and long-term effects of residue quality on soil C and N dynamics. Plant Soil, 338: 159-169

Giertz, S., Junge, B.&Diekkruger, B. 2005. Assessing the effects of land use change on soil physics properties and hydrological processes in the sub-humid tropical environment. Physics & Chemistry of the Earth, 30, 485-496

Groombridge, B. (editor). 1992. Global bioversity. Satatus of the Earth's living resources. WCMC, Cambridge y Cahpman&Hall, Londres

Haynes, R.J.; Beare, M.H. 1997. Influence of six crop species on aggregate stability and some labile organic matter fractions. Soil.Biol.Biochem. 29, 1647 - 1653

Hedde, M., Lavelle, P., Joffre, R., Jiménez, J.J.&Decaens, T.2005.Specific functional signature in soil macro-invertebrate biostuctures. Functional Ecology, 19, 785-793

Hyodo, F., Tayasau, I., Konate, S., Tondonh, J. E., Lavelle, P. & Wada, E. 2008. Gradual enrichment of N-15 with humification of diets in a below-ground food web: relationship between N15 and diet age determined using C-14. Funct Ecol, 22, 516-522.

Ibrahim, M.; Chacón, M.; Cuartas, C.; Naranjo, J.; Ponce, G.; Vega, P.; Casasola, F.; Rojas, J. 2007. Almacenamiento de carbono en el selo y en la biomasa arbórea en sistemas de usos de la tierra en paisajes ganaderos de Colombia, Costa Rica y Nicaragua, Agroforestería en las Américas, 45, 27-36

Imhoff, S.; Silva, A.P.; Dexter, A. 2002. Factors contributing to the tensile strength and friability of oxisols. Soil.Sci.Soc.Am.J. 66, 1656 - 1661

Intergovernamental Panel on Climate Change (IPCC).2007. Climate change 2000: The scientific basis.Oxford Univ Press, Oxford

Jenkinson D S & Rayner J H 1977. The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments. Soil Science, 123, 298-305.

Jimenez, J. J. & Lal, R. 2006. Mechanisms of C sequestration in soils of Latin America. Critical Reviews in Plant Sciences, 25, 337-365.

Jouquet, P., Dauber, J., Lagerlof, J., Lavelle, P.&Lepage, M. 2006. Soil invertebrates as ecosystem engineers:intended and accidental effects on soil and feedback loops. Applied Soil Ecology, 32, 153-164

Jouquet, P., Botinelli, N., Lata, J.C., Mora, P.&Caquineau, S. 2007a. Role of the fungus-growing termite Pseudacanthotermes spiniger(Isoptera, Macrotermitinae) in the dynamic of clay and soil organic matter content. An experimental analysis. Geoderma, 139, 127-133

Jouquet, P., Mathieu, J., Choosai, C.&Barot, S. 2007b. Soil engineers as ecosystem heterogeneity drivers. Ecology Research Progress (ed.S.I.Munoz), 187-199, Nova Science Publishers, Hauppauge, N.Y.

Jouquet, P.; Botinelli, N.; Podwojewski, P.; Hallaire, V.& Tran duc, T. 2008a. Chemical and physics properties of earthworm cast compared to bulk soil under a range of different land-use systems in Vietnam.Geoderma. 146, 231-238

Koutika, L. S., Bartoli, F., Andreux, F., Cerri, C. C., Burtin, G., Chone, T. & Philippy, R. 1997. Organic matter dynamics and aggregation in soils under rain forest and pastures of increasing age in the eastern Amazon Basin. Geoderma, 76, 87-112.

Lal, R. 2004. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. Geoderma. 123, 1-22

Laossi, K.R., Barot, S., Carvalho, D., Desjardins, T., Lavelle , P., Martins, M., Mitja, D., Rendeiro, A. C., Rousseau, G., Sarrazin, M., Velasquez, E., Grimaldi, M.2008. Effect of plant diversity on plant biomass production and soil macrofauna in Amazonian pastures. Pedobiologia, 51, 397 - 407

Lavelle, P.; Spain, A.V., 2001. Soil Ecology, Kluwer Academic Publishers, 165 – 169

Lavelle, P.; Spain, A. V.; Blanchart, E.; Martin, A.; Martin, S. 1992. The impact of soil fauna on the properties of soils in the humid tropics. En:Myths and Science of Soils of the Tropics. SSSA Special Publication. MadisonWisconsin. pp. 157-185.

Lavelle, P., Blanchart, E., Martin, S., Spain, A.V., Toutain, F., Barois, I., Schaefer, R. 1993. A hierarchical model for descomposition in terrestrial ecosystems: application to soils of the humid tropics, Biotropica, 25(2): 130-150

Lavelle, P., Decaens, T., Aubert, M., Barot, S., Blouin, M., Bureau, F., Margerie, P., Mora, P., Rossi, J.P., 2006. Soil invertebrates and ecosystem services. Eur. J. Soil Biol. 42, 3–15.

López-Ulloa, M.; Veldkamp, E.; De Koninig, G.H.J. 2005. Soil carbon stabilization in converted tropical pastures and forests depends on soil type. Soil Science Society of America Journal. 69(4). 1110-1117

Malhi Y., Wright J. 2004. Spatial patterns and recent trends in the climate of tropical rainforest regions. Phil. Trans. R. Soc. B 359: 311–329.

Mariani, L.; Jiménez, J.J.; Asawaka, N.; Thomas, R.J.& Decaens, T. 2007. What happens to earthworm casts in soil? A field study of carbon and nitrogen dynamics in neotropical savannas. Soil Biology & Biochemistry, 39, 757-767

Martin, A. 1991. Short and long-term effects of the endogeic earthworm Millsonia anomala (Omodeo) (Megascolecidae, Oligochaeta) of tropical savannas, on soil organic matter. Biol.Fertil.Soils, 11, 234 -238

Mathieu, J., Rossi, J.P., Grimaldi, M., Mora, P., Lavelle,P., Rouland, C., 2005. A multi-scale study of soil macrofauna biodiversity in Amazonian pastures. Biol. Fertil. Soil 40, 300–305.

Meersmans, J.; Van Wesemael, B. & Van Molle, M. Determining soil organic carbon for agricultural soils: a comparison between the Walkley & Black and the dry combustion methods (north Belgium). Soil use and Management, 2009, 25, 346-353

Melillo J.M.; Mcguire A.D.; Kicklighter D.W.; Moore B.; Vorosmarty C.J.; Schloss A.L. 1993. Global Climate Change and terrestrial net primary production. Nature 363: 234-240

Montenegro J.; Abarca S. 2002. Los sistemas silvopastoriles y el calentamiento global: un balance de emisiones. Agronomía Costarricense. 26(1), 17-24

Nepstad, D. C.; Uhl, C. & Serrão, E. A. S. 1991. Recuperation of a degraded Amazonian landscape – forest recovery and agricultural restoration. Ambio 20, 248−255

Nepstad, D.C.; Carvalho, C.R.; Davidson, E.A.; Jipp, P.H.; Lefebvre, P.A.; Negreiros, G.H.; Da Silva, E.D.; Stone, T.A.; Trumbore, S.E.; Vieira, S.1994. The role of deep roots in the hydrological and carbon cycles of Amazonian forests and pastures. Nature 372, 666 – 669

Oszwald, J., Gond, V., Doledec, S., Lavelle, P., 2011. Identification of land-use indicators to assess changes in landscape mosaics. Bois Et Forets Des Tropiques 7–21.

Palm, C.A. 1995. Contribution of agroforestry trees of nutrient requirements of intercropped plants, Agroforestry systems, 30, 105 - 124

Parton, W.J.; Anderson, D.W.; Cole, C.V. et al. 1983. Simulation of soil organic matter formation and mineralization in semiarid agroecosystems, Nutrient Cycling in Agricultural Ecosystems, Georgia Experimental Station, Athens, Georgia, 533-550

Parton, W.J.; D.S. Schimel, C.V. Cole, D.S. Ojima. 1987. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grasslands. Soil Science Society of America Journal 51:1173-1179.

Pulleman, M.M.; Six, J.; Van Breemen, N.&Jongmans, A.G. 2005. Soil organic matter distribution and micro aggregate characteristics as affected by agricultural management and earthworm activity. European Journal of Soil Science, 56, 453-467

Richardson, K., Steffen, W., Schellnhuber, H. J., Barker, T., Kammen, D. M., Leemans, R., Liverman, D., Munashinge, M., Osman-Elaska, B., Stern, N. & Waever, O. Synthesis report. Climate Change. global risks, challenges and decisions. In: IARU Climate Change Conference, 2009 Copenhaguen. http://climatecongress.ku.dk/pdf/ synthesisreport/ , 39pp.

Rilling, M.C.;Wright, S.F.; Shaw, M.R.; Field, C.B.2002b. Artificial climate warming positively affects arbuscular mycorrhizaee but decreases soil aggregate water stability in an annual grassland. Oikos. 97, 52 - 58

Rondon, M.A. ;Thomas, R.J., A piston – action ball mill for the rapid preparation of plant and soil samples for the automated analysis of nitrogen (15N) and (13C), Commun.Soil.Sci.Plant.Anal., 25 (3&4), 1994, 435 – 445

Rondon M.; Fernándes E.; Wandelli E.; Da Silva R. 2001. Fluxes of methane from soils in the Central Amazon: The role of the agroforestry systems. Department of Crop and Soil Sciences. Cornell University

Roscoe R.; Buurman, P.; Van Lagen B.; Velthorst, E. 2004. Transformations in occluded light fraction organic matter in a clayey oxisol: evidence from 13C-CPMAS-NMR and 13C signature . R.Bras. Ci. Solo, 28, 811-818

Saha, S.K.; Ramachandran, P.K.; Nair, V.D.; Kumar, M. 2010. Carbon storage in relation to soil size-fractions under tropical tree-based land-use systems. Plant Soil, 328: 433-446

Semenov, V.M.; Ivannikova, L.A.; Semenova, N.A.; Khodzhaeva, A.K.; Udal´tsov S.N. 2010. Organic matter mineralization in different soil aggregate fractions. Eurasian Soil Science, 43 (2), 141-148

Schimel D.S. 1995. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle. Global Change Biol 1:77-91

Silver, W. L., Neff, J., Mcgroddy, M., Veldkamp, E., Keller, M. & Cosme, R. 2000. Effects of soil texture on belowground carbon and nutrient storage in a lowland Amazonian forest ecosystem. Ecosystems, 3, 193 - 209.

Six, J.; Conant, R.T.; Paul, E.A.; Paustian, K. 2002a. Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C – saturation of soils. Plant Soil, 241, 155 - 176

Six, J.; Bossuyt H.; Degryze, S.; Denef K. 2004. Review - A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota and soil organic matter dynamics. Soil & Tillage Research 79, 7-31

Steinfald, H. et al, Livestock's long shadow environmental issues and options, FAO 2006, p 78 – 123.

Smith, J.U., P. Smith, T. Addiscott. 1996. Quantitative methods to evaluate and compare soil organic matter (SOM) models. In: Powlson D.S., Smith P., Smith J.U. (Ed.) Evaluation of soil organic matter models using existing, long-term datasets. Berlin: Springer-Verlag,. p.181-200. (NATO ASI Series I, 38).

Smith, P., J.U. Smith, D.S. Powlson, W.B. Mcgill, J.R.M. Arah, O.G. Chertov; K. Coleman, U. Franko, S. Frolking, D.S. Jenkinson, L.S. Jensen, R.H. Kelly, H. Klein-Gunnewiek, A.S. Komarov, C. Li, J.A.E. Molina, T. Mueller, W.J. Parton, J.H.M. Thornley, A.P. Whitmore. 1997. A comparison of the performance of nine soil organic matter models using datasets from seven long-term experiments. Geoderma, .81:153-225

Subbarao, G. V.; Nakahara, K.; Hurtado, M. P.; Ono, H.; Moreta, D. E.; Salcedo, A. F.; Yoshihashi, A. T.; Ishikawa, T.; Ishitani, M.; Ohnishi-Kameyama, M.; Yoshida, M.; Rondon, M.; Rao, I. M.; Lascano, C. E.; Berry, W. L.; Ito, O., 2009, Evidence for biological nitrification inhibition in Brachiaria Pastures, Proceedings of the National Academy of Sciences, vol. 106, issue 41, pp. 17302-17307

Tan, Z.; Lal, R. 2005. Carbon sequestration potential estimates with changes in land use and tillage practice in Ohio, USA. Agriculture, Ecosystems and Environment, 111, 140-152

Tian, H., Melillo, J. M., Kicklighter, D. W., Mcguire, A. D., Helfrich, J., Moore, B. & Vorosmarty, C. J. 2000. Climatic and biotic controls on annual carbon storage in Amazonian ecosystems. Global Ecology and Biogeography, 9, 315-335.

Velasquez, E.; Lavelle, P.; Barrios, E.; Joffre, R. & Reversat, F. 2005. Evaluating soil quality in tropical agroecosystems of Colombia using NIRS. Soil Bilogy & Biochemistry, 37, 889-898

Velasquez, E., Pelosi,C., Brunet, D., Grimaldi, M., Martins, M., Rendeiro, A.C. et al 2007. This ped is my ped: visual separation and near infrared spectra allow determination of the origins of soil macroaggregates. Pedobiologia, 51, 75-87

Wall, D. H., Bradford, M. A., ST John, M. G., Trofymow, J. A., Behan-Pelletier, V., Bignell, D. D. E., Dangerfield, J. M., Parton, W. J., Rusek, J., Voigt, W., WoltersS, V., Gardel, H. Z., Ayuke, F. O., Bashford, R., Beljakova, O. I., Bohlen, P. J., Brauman, A., Flemming, S., Henschell, J. R., Johnson, D. L., Jones, T. H., Kovarova, M., Kranabetter, J. M., Kutny, L., Lin, K. C., Maryati, M., Masse, D., Pokarzhevski, A., Rahman, H., Sabara, M. G., Salamon, J. A., Swift, M. J., Varela, A., Vasconcelos, H. L., White, D. & Zou, X. M. 2008. Global decomposition experiment shows soil animal impacts on decomposition are climate-dependent. Global Change Biology, 14, 2661-2677.