



DINÁMICA DEL CARBONO ORGÁNICO EN SUELOS DE SISTEMAS
AGROFORESTALES CAFETEROS EN TIBACUY, CUNDINAMARCA

DIANA VANESSA SANCHEZ TORRES

UNIVERSIDAD DE CIENCIAS APLICADAS Y AMBIENTALES U.D.C.A
FACULTAD DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN AGROFORESTERÍA TROPICAL
BOGOTÁ



DINÁMICA DEL CARBONO ORGÁNICO EN SUELOS DE SISTEMAS
AGROFORESTALES CAFETEROS EN TIBACUY, CUNDINAMARCA

DIANA VANESSA SANCHEZ TORRES

Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de Magister en
Agroforestería Tropical.

ANDREA PATRICIA VARGAS NIÑO

BIÓLOGA, MSc; Ph.D.

Directora de trabajo de grado

PIEDAD CECILIA ZAPATA ARANGO

AGROZOOTECTISTA, MSc

Codirectora de trabajo de grado

UNIVERSIDAD DE CIENCIAS APLICADAS Y AMBIENTALES U.D.C.A

FACULTAD DE INGENIERÍA

MAESTRÍA EN AGROFORESTERÍA TROPICAL

BOGOTÁ

2016

CONSTANCIA APROBATORIA

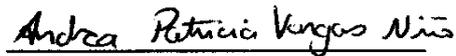
El presente documento ha sido debidamente revisado y evaluado de acuerdo a las normas establecidas por la Universidad, para validar el rigor y validez científica de los planteamientos y conclusiones en reflejadas, requisito parcial para optar al título de:

Magister Scientiae en Agroforestería Tropical



Edgar Martínez Granja, Ph.D.

Decano de la Facultad



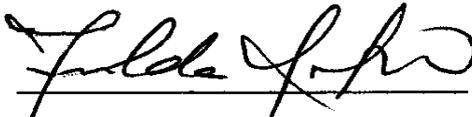
Andrea Patricia Vargas Niño, Ph.D.

Director de trabajo de grado



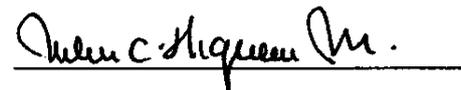
Piedad Cecilia Zapata Arango, MSc

Codirector de trabajo de grado



Jimelda Montañez Orozco, MSc

Jurado



Nubia Carolina Higuera Mora, MSc

Jurado

Dedicado a Dios y a mi Familia.

Por enseñarme el valor de la bondad,
el amor y la humildad.

Me han acompañado siempre y
agradezco todas las bendiciones que
he vivido a su lado.

Una familia fortalecida, unida y
ejemplo a seguir, porque han sido la
base de mis proyectos y la razón de
la felicidad de mis días.

AGRADECIMIENTOS

A Daniel Eduardo Díaz Holguín, Ingeniero agrónomo quien desarrollo su actividad como asistente de investigación, por su colaboración integral en las colectas y mediciones en campo, colaboración en la realización de bases de datos, trabajo de laboratorio y manejo del equipo CIRAS 3.

A Don Cesar Cortez Pulido y su esposa Flor Sabogal, por cuidarnos y brindarnos un hogar durante los meses de trabajo en campo.

A los Cafeteros: Alirio Moreno, Satoria Raigoso, Adoralis Rodríguez, Pedro Liévano, Graciliano Rodríguez, Hilda Tocua Burgos, Jacinta Castillo, Nancy Méndez, Otilia Tocua, Dioved Canacue, Cesar Segura Monroy, Fanny Murcia, Henry Rodríguez, Luis Gómez y Norbey España, por brindarnos sus terrenos para el proceso de investigación e involucrarse en el mismo manejando adecuadamente las parcelas temporales de estudio.

A Hernán Andrade Ph.D. por su asesoría general en las temáticas de Agroforestería y almacenamiento de carbono.

A los docentes Juan Carlos Suárez Salazar Ph.D. y Danny Sanjuanelo MSc por asesorarme en el análisis estadístico.

Andrea Vargas Ph.D. y Piedad Zapata MSc por la dirección y codirección de la tesis.

A los integrantes de los grupos del proyecto: carbono y fisiología, suelos y composición florística.

A Daniel Mora por facilitarme información climática de la estación meteorológica de la Granja la portada en Tibacuy y relacionarme con Wilmar Rendón de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, Centro Nacional de Investigaciones de Café "Cenicafé", Disciplina de Agroclimatología de Chinchiná, Caldas quien me entregó consolidados climáticos para el área de Tibacuy.

Al Convenio 009 de 2014 suscrito entre el departamento de Cundinamarca y la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, a través del cual se me otorgó la beca que me permitió desarrollar los estudios de maestría y la presente investigación.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	16
1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	18
1.1. Antecedentes del problema	18
1.2. Descripción de problema.....	19
1.3 Formulación del problema	20
1.4 Hipótesis.....	21
2. OBJETIVOS	21
2.1. Objetivo general	21
2.2. Objetivos específicos.....	21
JUSTIFICACIÓN	22
3. MARCO TEÓRICO	24
4. METODOLOGÍA	35
4.1. Descripción de área de estudio.....	35
4.2 Descripción de los sistemas agroforestales estudiados Sombra baja, Sombra media y Sombra alta.....	38
4.3. Descripción de las unidades de muestreo.....	41
4.4. Colectas en campo.....	42
4.5 Métodos estadísticos	50
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	52
5.1 Carbono orgánico almacenado en necromasa en fincas cafeteras con diferente nivel de sombrío.....	52
5.2 Carbono orgánico de suelo COS en fincas cafeteras con diferente nivel de sombrío	56
5.3 Respiración de suelo.....	63
5.4 relación entre respiración de suelo respecto a carbono almacenado en necromasa y COS.	69
6. CONCLUSIONES	75
7. RECOMENDACIONES	77
8. BIBLIOGRAFÍA.....	78
9. ANEXOS.....	87

LISTA DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1. Fórmula para hallar el volumen de carbono acumulado en madera muerta caída.....	44
Cuadro 2. Fórmula para hallar biomasa de las piezas de madera muerta caída.	44
Cuadro 3. Ecuación de factor de expansión de biomasa	45
Cuadro 4. Modelo alométrico de biomasa para Nogal	45
Cuadro 5. Ecuación para cubicación.	46
Cuadro 6. Fórmula para estimar densidad aparente del suelo	47
Cuadro 7. Fórmula para estimar porcentaje de pedregosidad de suelo.	48
Cuadro 8. Ecuación para estimar carbono orgánico del suelo.....	48

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Cultivo de café con sombrío tradicional diverso.	26
Figura 2. Sombrío del café en multiestrato	26
Figura 3. Ciclo del carbono edáfico.	30
Figura 4. Localización geográfica del Municipio de Tibacuy, Cundinamarca.	35
Figura 5. Mapa hídrico de Cundinamarca, Cuenca de Sumapaz.....	36
Figura 6. Mapa de ecosistemas de Tibacuy.....	36
Figura 7. Uso del suelo de Cundinamarca.....	37
Figura 8. Ubicación de fincas seleccionadas para el estudio de sistemas agroforestales cafeteros Tibacuy Cundinamarca.	37
Figura 9. Modelo de distribución arbórea horizontal.	41
Figura 10. Delimitación de parcelas temporales de 1000m ² , Tibacuy, Cundinamarca..	41
Figura 11. Parcela temporal de muestreo en Tibacuy, Cundinamarca.	42
Figura 12. Colecta de necromasa fina, en sistemas agroforestales cafeteros de Tibacuy Cundinamarca.....	43
Figura 13. Medición de madera muerta caída en sistemas agroforestales cafeteros en Tibacuy, Cundinamarca.....	44
Figura 14. Medición de madera muerta en pie en Tibacuy, Cundinamarca.....	45
Figura 15. Medición de madera muerta en pie, tocones en Tibacuy, Cundinamarca....	46
Figura 16. Colecta muestras de suelo, densidad aparente en Tibacuy, Cundinamarca. .	47
Figura 17. Colectas de respiración de suelo en Tibacuy, Cundinamarca.	49
Figura 18 Carbono almacenado en necromasa en Tibacuy, Cundinamarca.....	55
Figura 19 Carbono orgánico de suelo en Tibacuy, Cundinamarca, Colombia.....	57
Figura 20. Relación entre la densidad aparente (DA) y la concentración de carbono orgánico del suelo (%) Carbono orgánico de suelo en suelos cafeteros a una profundidad de 0 a 30 cm en Tibacuy, Cundinamarca, Colombia.....	59
Figura 21 Carbono orgánico almacenado en diferentes componentes en sistemas agroforestales cafeteros, en Tibacuy.	62
Figura 22. Respiración de suelo en sistemas agroforestales cafeteros de Tibacuy Cundinamarca, Colombia.	65
Figura 23. Pluviosidad y horas luz durante las mediciones de respiración de suelo en sistemas agroforestales cafeteros en Tibacuy, Cundinamarca.....	66
Figura 24. Respiración de suelo durante tres meses en sistemas agroforestales cafeteros en Tibacuy, Cundinamarca.	67
Figura 25. Relación entre almacenamiento de carbono en suelo, necromasa y respiración del suelo en sistemas agroforestales cafeteros en Tibacuy, Cundinamarca.	72

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Sistemas agroforestales cafeteros con diferente nivel de sombrío seleccionados en Tibacuy Cundinamarca.....	39
Tabla 2. Abundancia de árboles y musáceas en las áreas de muestreo Tibacuy Cundinamarca.....	40
Tabla 3. Carbono almacenado en necromasa en sistemas agroforestales cafeteros en Tibacuy, Cundinamarca.....	53
Tabla 4. Carbono orgánico de suelo COS en sistemas agroforestales en Tibacuy, Cundinamarca, Colombia.....	56
Tabla 5. Densidad aparente del suelo de los sistemas agroforestales estudiados en Tibacuy, Cundinamarca.....	58
Tabla 6 Carbono almacenado en los diferentes compartimientos para cada nivel de sombra de los sistemas agroforestales cafeteros, estudiados en Tibacuy, Cundinamarca.....	61
Tabla 7. Covariables de respiración de suelo en sistemas agroforestales cafeteros en Tibacuy, Cundinamarca.....	64
Tabla 8. Relación de respiración de suelo y el almacenamiento de carbono en compartimientos de necromasa y suelo.....	70

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1 Pluviosidad y horas luz durante meses de muestreo. Estación meteorológica Granja la Portada. Tibacuy, Cundinamarca	87
Anexo 2 Elementos menores de los sistemas agroforestales evaluados.....	87
Anexo 3 Complejo de cambio de suelo de los sistemas agroforestales cafeteros de Tibacuy, Cundinamarca	88
Anexo 4 Granulometría del suelo de los sistemas agroforestales cafeteros de Tibacuy, Cundinamarca.	89
Anexo 5 Análisis de suelo y materia orgánica de suelo de sistemas agroforestales cafeteros de Tibacuy, Cundinamarca	90
Anexo 6 Inventario forestal en área de estudio en el municipio de Tibacuy, Cundinamarca	91
Anexo 7 Autovalores de componentes principales para las variables de almacenamiento de carbono y respiración de suelo	92
Anexo 8 Autovectores de componentes principales para las variables de almacenamiento de carbono y respiración de suelo	92
Anexo 9 Valores de contraste de componentes principales	93
Anexo 10. Análisis de modelos lineales generales y mixtos para hojarasca.	93
Anexo 11. Análisis de modelos lineales generales y mixtos para madera muerta en pie.	94
Anexo 12. Análisis de modelos lineales generales y mixtos para madera muerta caída.....	94
Anexo 13. Análisis de modelos lineales generales y mixtos para carbono orgánico de suelo....	95
Anexo 14. Análisis de modelos lineales generales y mixtos para respiración de suelo.	95
Anexo 15. Análisis de modelos lineales generales y mixtos para respiración de suelo, pruebas de hipótesis.....	96
Anexo 16. Descripción equipo CIRAS3	97
Anexo 17. Acompañamiento social por parte de los caficultores de Tibacuy, en la investigación de dinámica de carbono orgánico de suelo en los sistemas agroforestales cafeteros.	99
Anexo 18. Características de los sistemas agroforestales cafeteros de Tibacuy, Cundinamarca	100

LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS

- (C): carbono orgánico presente en compartimientos
CO: Concentración de carbono orgánico en suelos
COS: carbono orgánico del suelo
CO₂: Dióxido de carbono
DA: Densidad aparente (g/cm³)
DAP: Diámetro del tronco a la altura del pecho en fustales
DA15 diámetro a la altura de 15 cm en cafetos
FEB: Factor de expansión de biomasa
GE: Gravedad específica
MMC: Madera muerta caída
MMP: Madera muerta en pie
SA: Sombra Alta
SM: Sombra media
SB: Sombra Baja
SAFC: Sistema agroforestal cafetero.

LISTA DE UNIDADES DE MEDIDA

- Cm: Centímetro
m²: Metro cuadrado
m: Metros
t: Toneladas
ha: Hectárea
μmoles: micro moles de CO₂
s. Segundo
°C: Grados celsius
h: Horas

RESUMEN

El CO₂ es un gas de efecto invernadero resultado de actividades antrópicas o procesos biológicos que influye en el aumento de la temperatura global. Los ecosistemas son fuente o reservorio de CO₂ y son alterados por cambios climáticos. En ese sentido, los sistemas agroforestales (SAF) fijan el CO₂ en carbono orgánico almacenado en suelo, necromasa, y productos forestales. El suelo es el mayor sumidero terrestre de carbono orgánico por lo que se hace necesario investigar sistemáticamente el efecto del dosel de sombra en el suelo de los sistemas agroforestales, debido a su aporte de microclimas, materia orgánica y barreras contra procesos erosivos del suelo, generando una dinámica de almacenamiento de carbono y de reducción en la respiración de suelo que pueden promover la adaptación y la mitigación del cambio climático. En Tibacuy, Cundinamarca se evaluó el efecto del dosel de sombra en el almacenamiento de carbono orgánico en suelos y la respiración de suelo de sistemas agroforestales cafeteros de Sombra alta (SA), Sombra media (SM) y Sombra baja (SB). Se seleccionaron 5 fincas por cada tipología de sombra realizando análisis fotográfico de apertura del dosel y de radiación transmitida con el software GLA® (Gap Light Analyzer), las fincas seleccionadas contaron con plantaciones de café variedad Castillo en edad productiva entre 4 a 8 años. En cada finca se estableció una parcela de 1000 m² en donde se estimó la respiración de suelo, el carbono almacenado en hojarasca y carbono orgánico de suelo COS. Se usó cámara SRC-1 de CIRAS3 para medir la respiración del suelo durante tres meses, en tres horas del día: 9:30am, 12:30m y 03:30pm; Se colectó hojarasca en entrecalles y bajo plantas de café; Se usaron transectos de línea perpendiculares para medir longitudes, diámetros y durezas de la Madera muerta caída (MMC) interceptada por la línea; Método de cubicación y factor de expansión de biomasa para estimar el carbono de la madera muerta en pie (MMP); se usó método de volumen conocido para densidad aparente y Walkey black para carbono orgánico de suelo (COS); por último se tomaron las condiciones climáticas del municipio para analizarlas con la respiración de suelo. Como resultado, el carbono orgánico total almacenado en los sistemas con diferente nivel de sombrero, presentó alta proporción en COS, seguido de hojarasca, MMC y MMP (137,7; 3,7, 3,01 y 0,95 t C/ha, respectivamente). El carbono en hojarasca presentó diferencias altamente significativas ($p < 0,0001$), con mayor almacenamiento en el sistema SA seguido de SB y SM (4,3, 3,7 y 3,2 t C/ha, respectivamente). El carbono en MMP presentó diferencias significativas ($p = 0,0003$) con mayor almacenamiento en el sistema SM seguido de SA y SB (1,2, 1,0 y 0,7 t C/ha, respectivamente). Carbono en MMC presentó diferencias altamente significativas ($p < 0,0001$) con mayor almacenamiento en el sistema SB seguido de SA y SM (4,8, 2,3 y 1,9 t C/ha, respectivamente). El carbono orgánico de suelo con diferencias altamente significativas ($p < 0,0001$), presentó mayor almacenamiento en el sistema SM, seguido de SA y SB (182,1, 121,0 y 109,9 t C/ha, respectivamente). La respiración de suelo con diferencia significativa ($p = 0,0046$), presentó mayor liberación en SM seguido SB y SA (1,0, 0,9 y 0,8 $\mu\text{moles CO}_2/\text{s}$, respectivamente). En la relación de variables, el carbono almacenado entre COS y necromasa fue mayor en SM seguido de SA y SB (188,4, 128,6 y 119,2 t C/ha, respectivamente). La respiración de suelo presentó relación directa con la covariable humedad relativa, con un valor mayor en SM seguidos de SB y SA (77,1, 76,0 y 74,4 mbar, respectivamente). La respiración de suelo fue mayor en el sistema SM, muy similar en el sistema SB; sin embargo, SM presentó un flujo de

carbono más activo, con mayor estabilidad de temperatura de suelo y ambiente, alto COS lo cual se relaciona con la presencia de los árboles que generan la sombra en el sistema. Por último, durante los tres meses de muestreo de respiración de suelo, la emisión de CO₂ se redujo en el mes con menos horas luz. El almacenamiento de carbono y la respiración de suelo afectados por el dosel de sombra presentaron diferencias altamente significativas, donde los suministros orgánicos al suelo y la inmovilización de carbono en la necromasa fueron fluctuaciones importantes en la reducción de las emisiones de CO₂ atmosférico. Estos resultados permiten concluir que el dosel de sombra afecta el positivamente el almacenamiento de carbono y la reducción de la respiración en suelos, donde los sistemas de sombra media son los que más favorecen en contraste con los otros dos sistemas a la mitigación y adaptación al cambio climático al mejorar la calidad del suelo como sumidero de carbono y evitar su degradación

Palabras clave: respiración de suelo, almacenamiento de carbono, nivel de sombrero.

ABSTRACT

CO₂ is a greenhouse gas resulting from human activities or biological processes influencing the increase in global temperature. Ecosystems are a source or reservoir of CO₂ and are altered by climate change, in that sense, agroforestry systems (SAF) fix CO₂ into organic carbon stored in soil, necromass, and forest products. The soil is the organic carbon largest terrestrial sink, so it is necessary to systematically investigate the effect of shade canopy on the floor of agroforestry systems, due to its contribution of microclimates, organic matter and barriers against soil erosion, generating a carbon dynamic storage and reduced soil respiration, that can promote adaptation and mitigation of climate change. In Tibacuy, Cundinamarca the effect of shade canopy in organic carbon storage in soils and soil respiration of coffee agroforestry systems high shade (SA), medium shadow (SM) and low shade (SB) was evaluated. 5 farms were selected for each type of shadow making photographic analysis of canopy opening and radiation transmitted with GLA® (Gap Light Analyzer) software, selected farms of coffee plantations Castillo variety, with 4 to 8 years of productive age. In each farm a plot of 1000 m² was established, where was estimated soil respiration, carbon stored in leaf litter and soil organic carbon (SOC). SRC-1 camera of CIRAS3 was used to measure soil respiration for three months in three hours a day: 9:30 am, 12: 30m and 3:30 pm; litter under coffee plants and between rows was collected; perpendicular line transects were used to measure lengths, diameters and hardnesses of dead wood fall (MMC) intercepted by line, Cubing method and biomass expansion factor to estimate carbon from dead standing timber (MMP). Method known volume for bulk density and Walkey black for soil organic carbon (SOC) was used. Finally the climatic conditions of the municipality were taken for analysis with soil respiration. As a result, total organic carbon stored in systems with different level of somber, presented high proportion of COS, followed by leaf litter, MMC and MMP (137.7, 3, 7, 3.01 and 0.95 t C / ha , respectively). Carbon in litter showed highly significant differences (p<0.0001), with storage greater in SA system followed by SB and SM (4.3, 3.7 and 3.2 t C / ha, respectively). Carbon in MMP showed significant differences (p= 0.0003) with more storage in the SM system followed by SA and SB (1.2, 1.0 and 0.7 t C / ha, respectively). Carbon in MMC showed highly significant differences (p<0.0001) with greater storage in SB system followed by SA and SM (4.8, 2.3 and 1.9 t C / ha, respectively). Soil organic carbon with highly significant differences (p<0.0001), presented more storage in the SM system, followed by SA and SB (182.1, 121.0 and 109.9 t C / ha, respectively). The soil respiration with significant difference (p= 0.0046), had a higher release in SM system followed by SB and SA (1.0, 0.9 and 0.8 μmol CO₂ / s, respectively). In the relation of variables, the stored carbon between COS and necromass was higher in SM followed by SA and SB (188.4, 128.6 and 119.2 t C / ha, respectively). The soil respiration presented directly related to the relative humidity covariable, with a higher value in SM followed by SB and SA (77.1, 76.0 and 74.4 mbar, respectively). The soil respiration was higher in SM, very similar in the system SB; however, the SM system it presented a carbon flow more active, soil temperature and ambiental temperature more stable, high SOC related to the presence of trees that generate the shadow in the system. Finally, during the three months sampling of soil respiration, CO₂ emissions fell in the month with less light hours. the carbon storage and soil respiration, affected, by shade canopy showed highly significant differences, where organic supplies to soil and the in necromass immobilization of carbon, was significant fluctuations in reducing atmospheric CO₂ emissions. These results suggest that the shade canopy affects positively carbon storage and reduced respiration in soils, where systems of medium shade (SM) are the most favorable in contrast with the other

two systems to mitigation and adaptation to change climate by improving soil quality, as carbon sink and prevent soil degradation.

Key words: soil respiration, carbon storage, shade level.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático ha representado en los últimos años una de las grandes amenazas para el planeta, debido a las actividades humanas que han aumentado las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) como el dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O) (Orrego *et al.* 2003).

El CO₂, durante la época preindustrial presentó concentraciones en la atmósfera de alrededor de 280 ppm y en la actualidad llega cerca de 370 ppm, este aumento del 80% no se presentaba desde hace aproximadamente 1600 años (Alvarado *et al.* 2013).

El suelo es el mayor sumidero terrestre de dióxido de carbono (CO₂) uno de los gases de efecto invernadero que interviene en el calentamiento global, los suelos del mundo sostienen más carbono orgánico que el almacenado por la vegetación y la atmósfera (Cruz, 2013).

Sin embargo, es la vegetación la que transforma el CO₂ en carbono orgánico y lo almacena en la madera, la materia orgánica, las raíces y el suelo, por medio del proceso enzimático de fijación y reducción de CO₂ produciendo azúcar simple, desde la energía almacenada en ATP y NADPH conducida a moléculas de transporte y almacenamiento del cuerpo de la planta, luego se forma el esqueleto de carbono, que es funcional para construir moléculas orgánicas (Sáenz, 2012).

La calidad del suelo es un factor que influye en el almacenamiento de carbono orgánico de suelo, donde las cualidades físicas, químicas y biológicas, son medidas como indicadores de: materia orgánica de suelo, estructura de suelo, infiltración, retención de humedad, biomasa microbiana, respiración de suelo, actividad enzimática entre otras (Araujo *et al.* 2007). Por lo tanto estos indicadores de calidad de suelo son parámetros para el estudio del almacenamiento de carbono orgánico de suelo (COS).

Por otro lado el suelo emite CO₂ que se origina de la respiración de las raíces y la respiración microbial. La medida de este comportamiento es muy variable ya que depende de la temperatura del suelo, porque los microorganismos responden rápidamente a cambios de las condiciones del suelo (Araujo *et al.* 2007).

Uno de los mecanismos de captura de CO₂, son los sistemas agroforestales (SAF) que permiten acceder a mercados de carbono, los cuales generan pagos por prestar servicios ambientales de captura de carbono, beneficiando a los productores de la región (Andrade *et al.* 2008). Los sistemas agroforestales son una alternativa para la mitigación del cambio climático, debido a las interacciones arbóreas que como describen Orrego *et al.* (2003), permiten el almacenamiento del carbono en la estructura de la planta durante la actividad fotosintética y el crecimiento, sumado al efecto de la senescencia de las raíces y demás necromasa en la fijación de carbono en el suelo.

Los sistemas agroforestales con café, comunes en las zonas cafeteras colombianas, se definen como simultáneos al estar asociado el café y los árboles (Muschler, 2000). Esta diversificación permite mantener la producción mientras las estructuras arbóreas aportan protección al cultivo. En esta categoría, gracias a la combinación de cultivos perennes, el árbol crea una cubierta superior muy abierta o muy cerrada, estas copas arbóreas generan sombra al suelo, denominado como dosel de sombra, propician microclimas que promueven la calidad del suelo al modular las temperaturas externas altas por un medio menos cálido bajo los árboles y pueden incidir en la disminución de la tasa de liberación de CO₂. Algunas de las especies en estos sistemas son *Erythrina* sp., *Inga* sp. y *Cordia alliodora* (Farfán, 2012).

La presente investigación se desarrolló en sistemas agroforestales cafeteros de sombra alta (SA), sombra media (SM), y sombra baja (SB) de Tibacuy, Cundinamarca, con el fin de estimar el almacenamiento de carbono orgánico y la respiración de suelo afectados por la sombra generada por estructuras arbóreas que beneficia el suelo como sumidero de carbono

El estudio se realizó en el marco del convenio especial de cooperación 009 del 24 de enero de 2014, en el macro proyecto “Estimar Vulnerabilidad al Cambio Climático de Sistemas Cafeteros y Diseño de Arreglos Agroforestales con Biotecnología, Pacho, Tibacuy, San Juan de Rio Seco, Cundinamarca.”. El macro proyecto fue ejecutado por la Gobernación del departamento de Cundinamarca a través de la Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación y operado por la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, en alianza con, la Corporación Latinoamericana Misión Rural y la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca.

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Antecedentes del problema

El suelo tiene un papel ecológico importante en la mitigación de los efectos del cambio climático, por su actividad en el ciclo de carbono y almacén del mismo, conservándolo durante miles de años (Schelesinger, 1990), influyendo en los gases asociados al ciclo del carbono provocados por la descomposición de la materia orgánica (CO_2 y CH_4) y en procesos desnitrificantes (N_2O y N_2) (Johnson, 1992). El suelo recibe la rizodeposición de las plantas, el carbono de las raíces y los restos de madera ó material vegetal, tejidos en los que se encuentra fijado el carbono después de ser metabolizado el gas carbónico a través de la fotosíntesis (Héiter *et al.* 1986). Los procesos mencionados requieren de conservar la calidad del suelo para que sean eficientes, por lo que es imperante manejar cultivos de cobertura que protejan al suelo de condiciones erosivas y que le aporten materia orgánica (Fageria *et al.* 2006).

De acuerdo con Schelesinger (1997), el suelo es el mayor compartimento de carbono de los ecosistemas terrestres, ya que su primer metro acumula el doble de carbono contenido en la atmósfera y el triple del acumulado por la vegetación que está sobre el suelo. El almacenamiento de carbono en el suelo, también se produce a través de la descomposición de la materia orgánica, los restos de poda y hojas caducas pueden verse como pérdida si se retira de la plantación o se queman, mientras que, si los restos de poda se descomponen naturalmente en el suelo, se convierte en un medio eficaz de inmovilización de CO_2 a largo plazo (Lal, 1997), para reforzar Jobbagy y Jackson (2000), determinaron que entre 1 y 3 m de profundidad, los bosques húmedos y las sabanas tropicales son los biomas que más contienen carbono a esas profundidades.

La capacidad del suelo como sumidero de carbono está relacionada con los aportes de materia orgánica y la diversidad de especies vegetales que la suministren. Es decir, la dinámica del carbono orgánico del suelo se ve afectada por la transformación de los bosques en potreros, monocultivos, uso de especies no nativas y el manejo de cultivos extractivos. Estas perturbaciones provocan la reducción de flujo de carbono hacia la capa terrestre, lo cual estimula la remoción de la materia orgánica edáfica y degradación

del suelo (MOS), además incrementa la liberación del CO₂ a la atmósfera (Gallardo & Merino, 2007).

Ibrahim *et al.* (2006) describen los usos de la tierra en los cuales se evaluaron el carbono orgánico de suelo y la biomasa arbórea en los departamentos de Quindío y Valle del Cauca en Colombia, el cantón de Esparza en Costa Rica y el municipio de Mataguás en Nicaragua. En los tres países el uso de suelo que presentó menor carbono total almacenado fue pasturas degradadas, diferente a bosques secundarios de Costa Rica y Nicaragua y bosques riparios de Colombia que presentaron mayor carbono total. El carbono orgánico de suelo (COS) en los sistemas estudiados en Colombia reportaron valores entre $52,3 \pm 9,8$ y $81,3 \pm 3,6$ t C ha⁻¹ en bosques riparios y pasturas mejoradas sin árboles, en Costa Rica se encontró un rango entre $95,1 \pm 6,6$ y $139,5 \pm 17,2$ t C ha⁻¹ para plantaciones forestales y pasturas mejoradas sin árboles y en Nicaragua los bosques secundarios presentaron mayor cantidad con $139,2 \pm 20,4$ t C ha⁻¹, por otra parte en Colombia, el carbono almacenado en biomasa arriba de suelo presentó valores de $158,7 \pm 12,5$ t C ha⁻¹ para bosques riparios, en Costa Rica las plantaciones de Teca almacenaron $92,4 \pm 11,3$ seguidos de bosque secundarios y $90,8 \pm 48,6$ t C ha⁻¹, y en Nicaragua los bosques secundarios reportaron mayor almacenamiento de carbono en biomasa $23,0 \pm 3,0$ t C ha⁻¹. Estos datos evidencian la capacidad que tiene el suelo para hacer el almacenamiento de carbono y la estrecha relación entre el carbono almacenado en biomasa y el acumulado en el suelo.

1.2. Descripción de problema

El calentamiento global actual se presenta por diversos procesos del sistema climático el cual será más notorio mientras avanza el siglo XXI e impactará los sistemas socio económicos y ecosistemas de diferentes regiones y países del mundo. Por esta razón, existe una preocupación generalizada y la sociedad intenta mitigar la expresión del fenómeno y adaptarse a nuevas condiciones (Pabón, 2011).

Una de las estrategias de adaptación al cambio climático es la incorporación de especies arbóreas a las áreas de cultivo agrícola para el almacenamiento de carbono. En los sistemas agroforestales existen reservorios de carbono (suelo, necromasa, biomasa y

productos forestales), con distintos tiempos de absorción y liberación del CO₂, diferenciados por los elementos que componen el sistema agroforestal. Pumpanen *et al.* (2004) indican que la relación entre producción de carbono y descomposición de materia orgánica determina si un sistema es sumidero o fuente de CO₂ atmosférico.

Las interacciones de los sistemas agroforestales permiten transformar el CO₂ en diferentes suministros del sistema, en estas interacciones interviene el suelo y es de particular importancia estudiarlas, para afrontar procesos de adaptación al cambio climático o mitigar sus efectos, pero es necesario generar estudios sobre almacenamiento de carbono en suelo y respiración de suelo directamente relacionado con el dosel de sombra y la composición de las copas de los árboles, ya que esto permitirá revelar que las interacciones de sombra hacia el cafetal son positivas para la adaptación al cambio climático, debido a la potencialización de los compartimentos de carbono de los sistemas agroforestales que aportarán a su vez servicios ambientales, debido a que estos sistemas fijan carbono en la biomasa de las plantas, reducen así su balance de gases de efecto invernadero o huella de carbono (Gobbi y Ibrahim, 2004).

1.3 Formulación del problema

Pregunta principal

¿La sombra generada por el dosel de los árboles afecta el almacenamiento de carbono orgánico en suelo de sistemas agroforestales con café en Tibacuy, Cundinamarca?

Preguntas específicas

¿Cuánto carbono orgánico almacena la necromasa y el suelo en tres niveles de sombrero de sistemas agroforestales cafeteros?

¿Cuánta es la liberación de CO₂ por respiración de suelo en de los sistemas agroforestales con nivel de sombra baja, sombra media, sombra alta?

¿Cuál es la relación que existe entre la respiración de suelo con el carbono almacenado en suelo y necromasa?

1.4 Hipótesis

Hipótesis nula

No existen diferencias significativas en el almacenamiento de carbono en suelo, necromasa con la respiración de suelo en sistemas agroforestales cafeteros en niveles de sombra baja, sombra media y sombra alta

Hipótesis alternativa.

Existen diferencias significativas en el almacenamiento de carbono en suelo y necromasa con la respiración de suelo en sistemas agroforestales cafeteros en niveles de sombra baja, sombra media y sombra alta.

El carbono almacenado en los compartimientos del sistema agroforestal cafetero varía significativamente por el aumento del porcentaje de sombra y la necromasa.

La respiración de suelo inversamente proporcional al porcentaje de sombra y cantidad de necromasa en sistemas agroforestales cafeteros.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Evaluar el efecto del dosel de sombra en el almacenamiento de carbono orgánico en suelos y la respiración de suelo de sistemas agroforestales cafeteros con tres niveles de sombrero en Tibacuy Cundinamarca

2.2. Objetivos específicos

Estimar la cantidad de carbono orgánico almacenado en suelo y necromasa en sistemas agroforestales cafeteros de sombra alta, media y baja.

Determinar la respiración de suelo en diferentes niveles de sombrero en los sistemas agroforestales cafeteros.

Analizar la relación entre almacenamiento de carbono en suelo, necromasa y respiración del suelo.

JUSTIFICACIÓN

Las condiciones atmosféricas o clima predominantes en una región, influyen directamente en la distribución espacial y en el funcionamiento de los ecosistemas, la alteración temporal o permanente afecta ampliamente a los sistemas generando impactos ambientales y socioeconómicos (Pabón, 2011).

El carbono almacenado en los sistemas agroforestales de Tibacuy depende en gran medida de los componentes del sistema como las especies arbóreas, el suelo, la materia orgánica y el cultivo de café. Según Dixon (1994), los reservorios de carbono están estrechamente relacionados, haciendo necesario un enfoque sistémico. Además existe poca información de las emisiones netas de los sistemas agroforestales como de los contenidos de carbono en vegetación y suelo de bosques tropicales, lo cual indica incertidumbre en los procesos de cambio de uso de suelo (Masera, 1997).

Existen pocos estudios que estimen el potencial de acumulación de carbono en el suelo por la composición del dosel de sombra, por lo cual el presente estudio contribuye en determinar la cantidad de CO₂ liberado por segundo de la respiración de suelo, el carbono orgánico de suelo (COS) y el carbono almacenado en necromasa, teniendo en cuenta la sombra generada por el dosel. Es un proceso necesario para conocer la capacidad de los sistemas agroforestales cafeteros como mitigadores de las emisiones de gases de efecto invernadero y alternativa de adaptación al cambio climático.

Los resultados del estudio son importantes para el avance científico en cuanto a las relaciones de las condiciones climáticas como la temperatura del ambiente, la temperatura del suelo y a humedad relativa, factores que intervienen en la respiración de suelo, además pueden servir como herramienta de contraste de otras investigaciones sobre almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales u otros sistemas productivos, por otro lado estudiantes y productores pueden tomar este estudio como referencia de trabajo de campo.

La información resultado del estudio afianza el cumplimiento de la protección de la biodiversidad en los sistemas de producción agrícola, como base de normativas para el adecuado uso del suelo, fuentes maderables, corresponsabilidad social y el

aprovechamiento del cultivo de café por las comunidades rurales asociando arboles benéficos para la conservación de calidad del suelo.

Este estudio resalta, además, la importancia de los árboles en la presencia de carbono orgánico de suelo COS, siendo fuente de información para los responsables locales y ciudadanos sobre la conservación de las especies maderables y el cumplimiento de la ley de conservación de las reservas forestales de Tibacuy.

Esta experiencia allega la transferencia de biotecnología a los productores cafeteros al aplicar las metodologías de estimación de la respiración de suelo, el almacenamiento de carbono en suelo y necromasa en sus propios predios y comprender la importancia de las interacciones de los árboles en el cultivo de café para la reducción de los factores que alteran la temperatura global.

Finalmente, los resultados derivados de esta investigación permitirán fortalecer los conocimientos sobre los servicios ambientales aportados por los SAF y serán un insumo para el establecimiento de esquemas de pago por servicios ambientales en la zona, que permitan complementar los ingresos económicos a las comunidades rurales.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 La Agroforestería

La Agroforestería es el conjunto de técnicas de manejo de la tierra que indica la combinación de árboles con cultivo o con animales domésticos, o la combinación de los tres: Tal combinación puede ser simultánea o secuencial, manteniendo el principio de rendimiento sustentable. En esta combinación debe haber una interacción significativa. Budowski (1993). Las interacciones significativas fueron determinadas anteriormente como las interacciones ecológicas y económicas entre los diferentes componentes de los sistemas agroforestales (Lundgren & Raintree, 1982).

Esta definición implica que los sistemas agroforestales incluyen dos o más especies de plantas o animales por una especie leñosa perenne, resultando dos o más productos del sistema. El ciclo productivo supera el año y aunque sea un sistema simple, demostrara complejidad en estructura, economía y funcionalidad ecológica (Nair, 1997).

Los sistemas agroforestales están relacionados al orden de los agroecosistemas visto desde la percepción de sistemas complejos. Los agroecosistemas han sido intervenidos por el hombre para la selección de individuos agrícolas, pecuarios y de transformación, efectuando un control deliberado del sistema en su transformación y conservación (FAO, 1998). En los sistemas agroforestales se puede hacer uso de buenas prácticas agrícolas mientras que se protege las funciones ecológicas mencionadas anteriormente y se amortigua el efecto del cambio climático.

3.1.1 Sistemas Agroforestales Cafeteros

El café tiene sus orígenes a 1370 – 1830 m.s.n.m en ecosistemas boscosos de las zonas montañosas de Etiopia, con un microclima fresco, semisombra y humedad proporcionada por las especies forestales (Fischersworing y Robkamp 2001).

Los sistemas agroforestales integran árboles o plantas leñosas que crecen deliberadamente y al mismo tiempo con cultivos agrícolas, pastos y animales en la misma unidad de tierra, con diferentes interrelaciones negativa o positiva y uso de la energía con el fin de obtener una producción sostenible y ecológica (Farfán, 2012).

Un sistema agroforestal (SAF) favorece la productividad y sostenibilidad del suelo, asocia el crecimiento deliberado de componentes arbolados (perennes) y no maderables, cultivos, pastos, animales, en tiempos y espacios específicos, con interacciones de interés ecológico y económico (Combe & Budouski 1979). El uso de SAFs reduce la aplicación de insumos, genera eficiencia de mano de obra e implica ajustar estas tecnologías para ser aplicadas en las practicas locales (Nair, 1985).

La producción agrícola en Colombia es muy variada, siendo el café uno de los productos bandera y producido en asocio con árboles y es definido por Farfán (2014) como “un sistema agroforestal cafetero es un conjunto de prácticas de manejo del cultivo, donde se combinan especies arbóreas en asocio con el café o en arborización de fincas, cuyo objetivo es el manejo, conservación del suelo y del agua, el aumento y mantenimiento de la producción para garantizar la sostenibilidad y el fortalecimiento del desarrollo social y económico de las familias cafeteras”.

El asocio de árboles con el cultivo de café, diversifica la producción y adhiere los aromas y sabores dados por los árboles del sistema, al mismo tiempo que los árboles protegen al cultivo de café de las inclemencias del clima como la lluvia, el sol o los vientos. En Colombia los arboles comúnmente asociados para ejercer las características mencionadas son el Vainillo (*Senna spectabilis*), Roble (*Colombobalanus excelsa*), Nogal (*Cordia alliodora*) entre otros (Farfán, 2012).

De acuerdo a la clasificación de Farfán (2008), los sistemas agroforestales combinan árboles y cultivos denominados simultáneos, los sistemas agroforestales cafeteros de Tibacuy pertenecen a esta categoría por presentar cultivo de café variedad Castillo asociado a diferentes especies de árboles, musáceas y frutales. Además por la organización no deliberada de árboles en el cultivo de café y la diversidad de los mismos se clasifica como un “arreglo de cultivo de café con sombrío tradicional diverso” (Figura 9). Por último, la disposición de las copas que se traslapan o que se

presentan en diferentes alturas unas de otras, presentando diferentes capas el sistema se cataloga como multiestrato (Figura 1).



Figura 1. Cultivo de café con sombrero tradicional diverso. Fuente: Farfán (2008) Producción de café en sistemas agroforestales.



Figura 2. Sombrero del café en multiestrato (*Inga sp.* + *Albizia sp.* + *Erythrina sp.*, otros) Fuente: Farfán (2008) Producción de café en sistemas agroforestales.

3.1.2. Los Sistemas Agroforestales y la mitigación del cambio climático

Entre las diferentes causas del aumento del CO₂ se mencionan la tala exagerada, transformación del paisaje y cuerpos de agua en el remplazo de ecosistemas por ciudades, extracción de arena, roca y minerales dejando suelos desnudos y recabados, además la disminución de la cobertura vegetal que afecta la biodiversidad y provoca cambios climáticos asociados al aumento de CO₂ en la atmósfera (Márquez, *et al.* 2005). Entonces la complejidad es mayor cuando existe baja cantidad de vegetales con funcionalidad de consumo de CO₂ y descomponedores que transformen los materiales en desecho, por ende; el efecto invernadero aumenta (Codinza, 2006).

El CO₂ encontrado en el aire y el agua, es transformado por las plantas en compuestos orgánicos¹ por medio de la fotosíntesis, usando la energía del sol, se transforma de gas carbónico a carbono orgánico mientras se producen tallos, hojas y raíces (McVay & Rice, 2002), luego la respiración, la fermentación y la combustión devuelven el CO₂ a la atmósfera, cuando la materia orgánica no es totalmente mineralizada y sus compuestos se fraccionan en más compuestos orgánicos pueden retardar el ciclo de carbono (Codinza, 2006). Razón por la cual la transformación del carbono en los árboles, el humus y el suelo es más lenta, y se convierten en reservorios de carbono orgánico indicando además que las plantaciones forestales son un receptor del gas carbónico.

En los estratos de vegetación leñosa de los sistemas agroforestales se desarrolla la captura de carbono y en este tipo de sistemas el suelo es forestal o está en transformación para convertirse en la categoría mencionada, proceso en el que se requiere monitorear la superficie vegetal por especie arbórea, el promedio de las reservas de carbono por unidad de superficie y el tipo de bosque (Penman & Gytarsky, 2003).

La disminución de gas carbónico en la atmósfera está directamente relacionado con el aumento del carbono orgánico en el suelo y son diferentes los mecanismos para llegar a esto. Por ejemplo, el ciclo de nutrientes donde las raíces fijan nitrógeno y carbono en forma de nitratos y carbonatos, otro es la necromasa entre esta la hojarasca y la madera muerta, así el carbono que se ha alojado en la planta durante el crecimiento a través de la división celular, se conserva en la materia orgánica como hojas y ramas que han caído al suelo, pues la vegetación es fundamental como mecanismo receptor que atrapa el CO₂ y lo inyecta al suelo (Peris, 2013).

La Agroforestería incluye prácticas de manejo de bosques y cultivos asociados que reducen la erosión, incrementan las coberturas productivas y mejoran los recursos naturales, debido a la capacidad vegetal de transformar el carbono disponible en el aire como carbono orgánico y almacenarlo en el suelo. Según Espinoza (2005), los suelos contienen más carbono que la vegetación y la atmósfera, la cantidad de carbono orgánico almacenado en suelo a un metro de profundidad oscila entre 1.500 Pg.

¹ Compuestos orgánicos son los glúcidos, lípidos y proteínas que son usados también por las plantas para su crecimiento y es alimento de consumidores y descomponedores.

En doble vía la conservación de la cubierta forestal y el almacenamiento de carbono revisten un servicio ambiental, fomentando la remuneración por sintetizar dióxido de carbono en zonas conservadas de bosque. Esto es pagado a los propietarios de zonas críticas para la conservación de cuenca hidrológica en Costa Rica, con un monto aproximado de U\$30 y U\$50 ha/año. En Estados Unidos los pagos gubernamentales por la protección del ecosistema oscilan entre U\$25 a U\$125 ha/año siendo un referente para la planeación de pagos similares en México (Molnar, Scherr & Khare, 2004).

3.2 Calidad de suelo

La calidad del suelo es definida como la capacidad del suelo de sustentar a la diversidad biológica, regular el flujo de agua y solutos, degradar e inmovilizar compuestos orgánicos e inorgánicos para que actúen en el ciclo de nutrientes y otros elementos (Seybold *et al.* 1998). Según Araujo *et al.* (2007) la calidad de suelo es medida a través de indicadores que pueden estar relacionados con el nivel de sustentabilidad de un ecosistema, como indicadores físicos, químicos y biológicos. Estos indicadores pueden ser la materia orgánica, físicos como la estructura del suelo, infiltración o capacidad de retención de humedad, químicos como el pH, la conductividad eléctrica o contenido de N, P y K y biológicos como la biomasa microbiana, mineralización de nutrientes, respiración de suelo, fijación de nitrógeno y actividad enzimática (Doran, J. *et al.* 1994).

Una de las propiedades físicas, es la textura del suelo y no se cambia con las prácticas culturales, la clase textural del suelo es la interpretación de la proporción en $g\ kg^{-1}$ de suelo de partículas de diferentes granulometrías. Las partículas de suelo tienen tamaños grandes como granos de arena (2 a 0,02 mm de diámetro), limo (0,02 a 0,002 mm) y finas como la arcilla (menos de 0.002 mm). Por otro lado la estructura de suelo es la agrupación de partículas de arena, limo y arcilla, llamados agregados y están dispuestos en varios patrones. La estructura del suelo puede ser evaluada describiendo la estabilidad de los agregados y distribución de tamaño de poro, características que pueden cambiar según el sistema de cultivo y la preparación del suelo (Fageria, 2006).

La compactación del suelo define la presencia de oxígeno y agua en el suelo, la compactación del suelo consiste en la reducción del espacio poroso causado por una

carga aplicada al suelo (Kulli, 2002), se mide usando el valor de resistencia a la penetración y es un factor que afecta el crecimiento de plantas y el manejo del suelo, esta resistencia a la deformación se puede asociar a medidas como densidad aparente, contenido de agua (Dexter *et al.* 2007) materia orgánica del suelo o agentes cementantes (Aggarwal *et al.*, 2006).

Los indicadores biológicos del suelo son importantes para los procesos de almacenamiento de carbono, por lo que el suelo sostiene una capa de desechos rica en organismos descomponedores de residuos y raíces muertas, de este proceso resultan los nutrientes que a través del tiempo estarán disponibles para diferentes individuos y que han sido reciclados por las plantas por medio de su descomposición, dando origen a nuevos organismos, por lo cual la capa más externa de la tierra es la más diversa (USDA, 1998). Según Sullivan (2007), el suelo se compone de minerales, aire, agua y materia orgánica. Los minerales representan alrededor del 45% del volumen total, el agua y el aire cerca del 25% cada uno y de materia orgánica 2% o 5%.

Las condiciones físicas y químicas son de difícil transformación pero las condiciones biológicas son dinámicas, puede tener relación con el proceso de almacenamiento y liberación de carbono de suelo, una de estas es la biomasa microbiana del suelo definida como el componente vivo de la materia orgánica del suelo, sin contar con la macrofuna y raíces de las plantas, además la proporción presente de carbono en células microbianas vivas (C-microbiano, en mg Kg^{-1} de suelo) comprende de 1 a 5% de carbono orgánico total y de 1 a 6% de nitrógeno (Jenkinson *et al.* 1981)

Las propiedades bioquímicas y microbiológicas son importantes para definir las funciones productiva, filtrante y degradativa del suelo, por lo que los aspectos biológicos y bioquímicos influyen en el mantenimiento de la fertilidad de los hábitats terrestres y en consecuencia en el funcionamiento de los ecosistemas forestales y agrícolas (Acuña *et al.* 2006).

Según Fageira (2006) mantener la calidad del suelo no solo es bueno para la actividad agrícola, también para mantener los servicios ecosistémicos del suelo, mejora la calidad del medio ambiente y reduce la contaminación. Problemas que refiere como complejos porque se involucran factores asociados al clima, las plantas el suelo y los humanos, para lo que sugiere usar adecuadamente los fertilizantes, aumentar la eficiencia del uso del agua, rotación de cultivos, controlar la erosión del suelo, enfermedades y plagas.

3.3 El carbono edáfico

Los elementos del sistema agroforestal tienen zonas de acopio del carbono y estructuras bióticas o abióticas que intervienen en la emisión y la captura del carbono. Las reservas terrestres del carbono en los diferentes ecosistemas se encuentran en; la biomasa de plantas vivas (aérea o subterráneas como hojas y raíces), biomasa de plantas muertas (aérea y subterránea) y en el suelo (materia orgánica, biomasa animal y microorganismos del suelo) (REDD+, 2011). Por lo que el suelo en conjunto con la necromasa son dos sumideros de carbono.

Existen etapas vegetales de transformación de CO_2 , la asimilación que depende de la luz, procesada mediante la fotosíntesis y la fijación en la fase de oscuridad, donde el CO_2 de la atmósfera es capturado y reducido por adición de hidrógeno (H^+) para la formación de carbohidratos $[(\text{CH}_2\text{O})]$. La incorporación del CO_2 en compuestos orgánicos, se conoce como fijación o asimilación del carbono. La energía usada en el proceso proviene de la primera fase de la fotosíntesis (Carvajal, 2010).

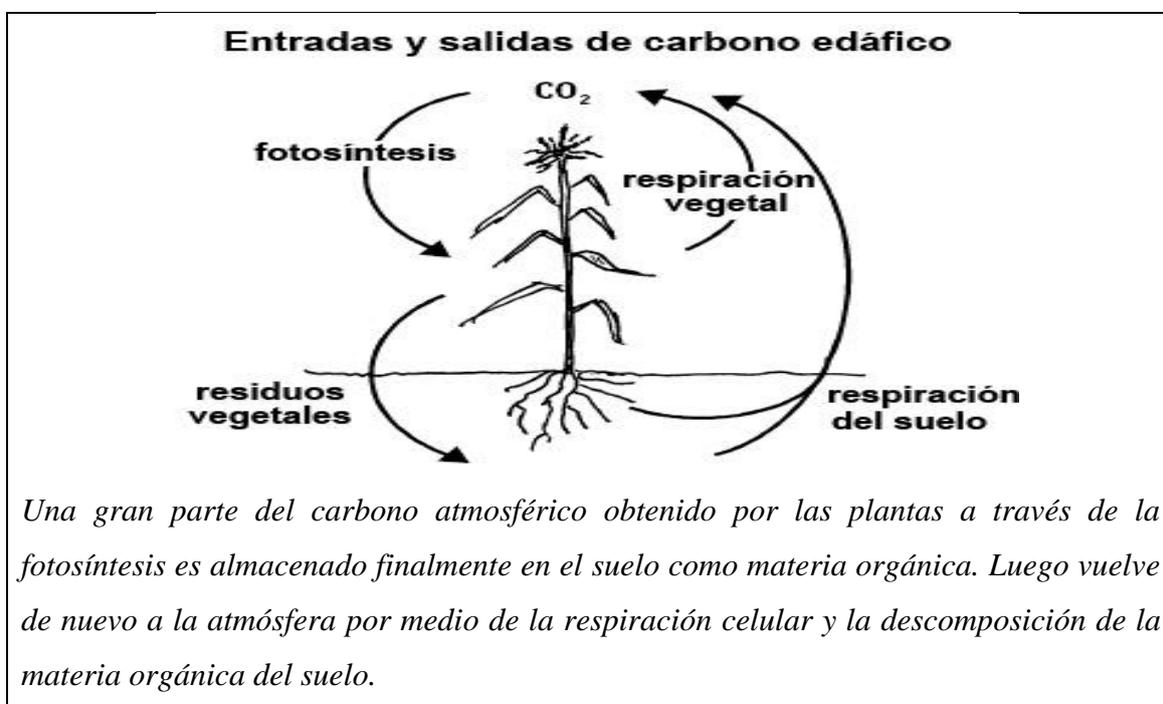


Figura 3. Ciclo del carbono edáfico. Tomado de: Midiendo el flujo del CO_2 del suelo Lessart *et al.* (2010).

El nivel máximo de acumulación de carbono orgánico de suelo (COS) es la “saturación” aunque la capacidad de almacenamiento de carbono no sea siempre mayor, puede estar en cero la tasa de almacenamiento con crecientes niveles de acumulación de materia orgánica (Six *et al.* 2002, West & Six, 2007, Stewart *et al.* 2007, Stewart *et al.* 2008). Según investigaciones, el suelo, después de ser perturbado puede recuperar el equilibrio, ese punto de equilibrio relativo se conoce como “capacidad de almacenamiento de COS” (West & Marland, 2003).

El carbono de suelo es afectado por la labranza exponiendo a los organismos heterótrofos a la presión parcial de oxígeno (ca 20 kpa) o el suelo a erosión por viento y agua, pero también, un suelo en un ambiente mal drenado o con poca aireación disminuye la transformación de la materia orgánica (Singer & Munns, 1996, y Haraguchi *et al.* 2002).

3.3.1 Carbono Orgánico de Suelo (COS)

El carbono edáfico es el resultado del proceso de almacenamiento de carbono orgánico del suelo y la liberación del mismo en forma de CO₂, entre otras interacciones. El carbono orgánico de suelo (COS) se encuentra en formas muy condensadas de composición próxima al elemental (Jackson, 1964). Según Martínez *et al.* (2008) existe poca información sobre el efecto del aumento del carbono orgánico de suelo y de conocer a profundidad más información sobre los efectos del COS sobre las propiedades del suelo y como estas favorecen a los cultivos.

En el ciclo de carbono (C) interviene el carbono orgánico de suelo (COS) ocupa el 69,8% del carbono orgánico de la biosfera (FAO, 2001) por lo que se hace necesario evitar la erosión y modular las prácticas agrícolas en beneficio de la estructura del suelo, ya que el carbono orgánico de suelo (COS) está asociado con los nutrientes presentes y disponibles en el suelo, además de la solubilidad varios nutrientes cuando se modifican hacia la neutralidad las condiciones de acidez y alcalinidad del suelo. Se asocia a la materia orgánica por su aporte de coloides de alta capacidad de intercambio catiónico. El COS depende de las condiciones ambientales y por el manejo del suelo (Martínez *et al.* 2008).

El carbono orgánico del suelo es la transformación del carbono atmosférico (CO₂) en carbono orgánico al atravesar por procesos energéticos y de crecimientos de las plantas alojándose en la biomasa vegetal y el suelo, por lo cual la interacción del ciclo global del carbono depende del 69,8% del carbono orgánico del suelo pues es el compartimento de carbono más amplio, depende su actividad de reservorio del uso y manejo, es fuente de energía para organismos heterótrofos e interviene en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Espinoza, 2005).

Los flujos entre el carbono orgánico del suelo y la atmósfera son positivos bajo la forma de captura o negativos como emisión de CO₂, la dinámica del carbono orgánico en los suelos naturales presenta un balance dinámico entre la absorción del material vegetal muerta y la pérdida por descomposición generada en procesos aeróbicos del suelo, de esta manera gran parte del carbono que ingresa al suelo es lábil y solo el 1% (55 Pg/año)² se acumula en la fracción húmica estable 0,4 Pg /año (FAO, 2002).

El contenido de carbono orgánico de suelo tiene una relación inversa con la densidad aparente, debido a que la incorporación de materia orgánica al suelo reduce la compactación, por ende desciende la densidad aparente, una densidad muy alta podría suponerse en sistemas de monocultivo, suelos muy labrados y compactados siendo diferente el contenido de carbono orgánico de suelo (Andrade & Ibrahim, 2003).

El carbono orgánico es almacenado en el suelo por medio de la incorporación de la materia orgánica proveniente de los residuos de las plantas, esta materia orgánica de suelo (MOS) puede distinguirse de acuerdo a su origen, si es producida por plantas C4 o C3 (Martin *et al.* 1990). Por ejemplo las plantas C4 son menos discriminantes del ¹³C atmosférico, un isotopo del carbono estable presente naturalmente en el CO₂ (Balesdent *et al.* 1987). Por otra parte la necromasa y la senescencia celular de las raíces, también aporta residuos orgánicos al suelo, según investigaciones de Héiter *et al.* (1986) sobre aportes de MOS en cultivos de maíz, la rizodepositación obtuvo el 15% y aporte de C por las raíces del 85% en el proceso del almacenamiento.

² Petagramo (Pg); un petagramo (gigatonelada) equivale a mil millones de tonelada (10⁹ t; 10¹⁵g)

3.3.2 Respiración de suelo

La respiración del suelo es definida como la producción de CO₂ proveniente de dos procesos: la oxidación de la materia orgánica rica en carbono por medio de microorganismos del suelo, y la respiración de las células de las raíces de las plantas (Lessart *et al.* 2010).

El CO₂ lábil está relacionado con un tamaño de agregados de suelo mayor (Buyanovsky *et al.* 1994) contrario al contenido altamente húmico con porciones finas de suelo representando un periodo de residencia de CO₂ en suelo mayor a siete años (Buyanovsky *et al.*, 1994). Así como interfiere la estructura del suelo, existen diferentes agentes en el suelo encargados de la liberación de CO₂: (1) descomposición microbiana de la materia orgánica del suelo, libre de raíces y residuos de plantas, descrita como respiración basal; (2) la descomposición microbiana de la materia orgánica de suelo con raíz y residuos de plantas descrito como enriquecimiento por la rizosfera y residuos de plantas; (3) la descomposición microbiana de los restos vegetales muertos; (4) la descomposición microbiana de rhizo-depósitos de raíces vivas, a menudo referido como respiración rizomicrobial; y (5) la respiración de raíces (Kuzyakov, 2006).

Por otro lado también intervienen procesos químicos, como el redox en la liberación de CO₂, donde la principal fuente de electrones para la reducción biológica, es la materia orgánica (Fegeria, 2006). Por ejemplo el peróxido de hidrógeno (H₂O₂) es un agente oxidante cuando acepta electrones de la materia orgánica y se oxida en CO₂ (H₂O₂ + materia orgánica + 2H⁺ = 2H₂O + C CO₂) (Bohn *et al.*, 1979).

El proceso redox cambia las concentraciones y disponibilidad de nutrientes, como el aumento del pH en suelos ácidos y su disminución en suelos calcáreos y sódicos, la reducción de SO₄ a SO₂ que puede provocar alteraciones en plantas por falta de disponibilidad de nutrientes o generar reducciones que aumenten la disponibilidad de fósforo, silicio y molibdeno y que disminuyan las concentraciones de zinc y cobre solubles en agua (Fegeria, 2006).

La meso fauna y microfauna del suelo generan liberación de CO₂ de suelo, estas fuentes de CO₂ obedecen a una tasa de rotación (TR, Turnoverrate) de los depósitos de carbono. Entonces TR es la velocidad del ciclo del carbono en un depósito de un sistema, el tiempo que transcurre entre la fijación de C y la liberación de exudados, es el rango entre asimilación de C y el flujo de salida de CO₂ del suelo que puede ser desplazado en tiempo (Kuzakov, 2006). Siendo más utilizada la medición *in situ* de raíces, hojarasca y suelo. La hojarasca al ser medida en el sitio destaca las cualidades del almacén de carbono, de acuerdo con las especies de las cuales provienen las hojas y las ramas, con un porcentaje de lignina característico y estructuras como componentes químicos de la hoja que eviten o promuevan su descomposición lo cual es importante para la retención del carbono o la liberación del CO₂ (Hanson, 2000).

La materia orgánica en cierto grado de descomposición mejora la calidad del suelo, por que incrementa la humedad, regula la temperatura superficial del suelo y promueve el almacenamiento de carbono. La descomposición de la materia orgánica es afectada por factores ambientales como la humedad y la temperatura del suelo, promueve la pérdida de carbono o emisión de CO₂ siendo la intensidad de la actividad microbiana mayor a altas temperaturas (Lessart *et al.* 2010).

Otros factores que reducen la calidad biológica del suelo son los factores climáticos como las altas temperaturas y el déficit de agua, por lo que se requiere, promover sistemas agrícolas que conserven la humedad de suelo y microclimas propicios para la actividad de los componentes del sistema. La degradación biológica es la pérdida de materia orgánica, biomasa de carbono y actividad biótica de la fauna del suelo (Lal, 1989). Lo anterior indica que los cambios de las condiciones de calidad y actividad del suelo pueden cambiar por factores externos, por lo que se debe procurar usar sistemas agrícolas que procuren la conservación del suelo y la reducción de factores que generen catalizador de emisión de CO₂ edáfico.

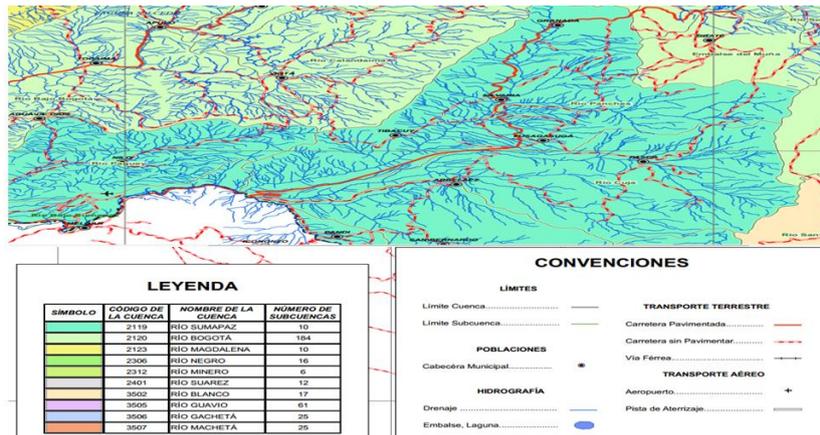


Figura 5. Mapa hídrico de Cundinamarca, Cuenca de Sumapaz, fuente: Secretaria de Desarrollo de la Gobernación de Cundinamarca (2014).

Tibacuy pertenece al Orobioma bajo de los Andes, contiene ecosistemas de vegetación secundaria, áreas agrícolas heterogéneas, pastos, cultivos semipermanentes y permanentes (INVEMAR, 2014) (Figura 6). Las características de paisaje, la presencia del recurso hídrico e interrelación de ecosistemas ciñen a Tibacuy en la zona de vida bosque húmedo premontano (Holdridge, 1947).

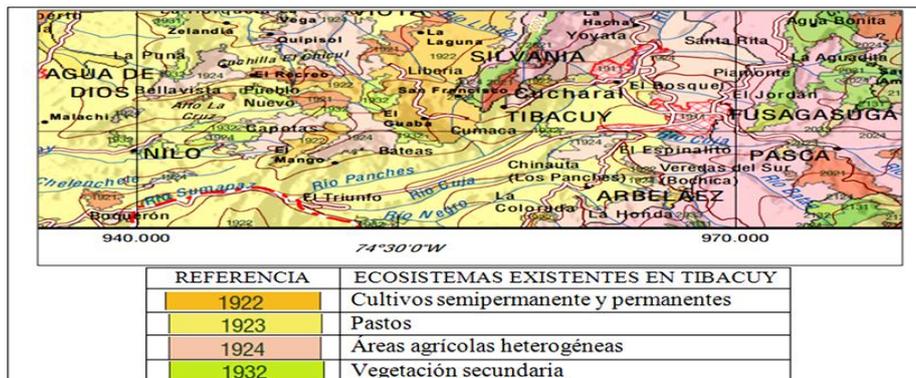


Figura 6. Mapa de ecosistemas de Tibacuy, fuente Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras “José Benito Vives de Andrés” -INVEMAR- (2014).

Este municipio se caracteriza por su tradición cafetera y poseer 1.755.3 ha de reserva forestal en el Cerro del Quinín, y 1.630.0 ha de reserva forestal de Peñas Blancas. Las coberturas específicas del municipio son: matorrales abiertos, bosques abiertos, cobertura agrícola y bosques densos. La cobertura general es de vegetación arbustiva, vegetación tipo agropecuario, vegetación boscosa. Por último la cobertura es de origen: natural, natural intervenido y antrópico. Secretaria de Planeación de Cundinamarca, (2007) (Figura 7).

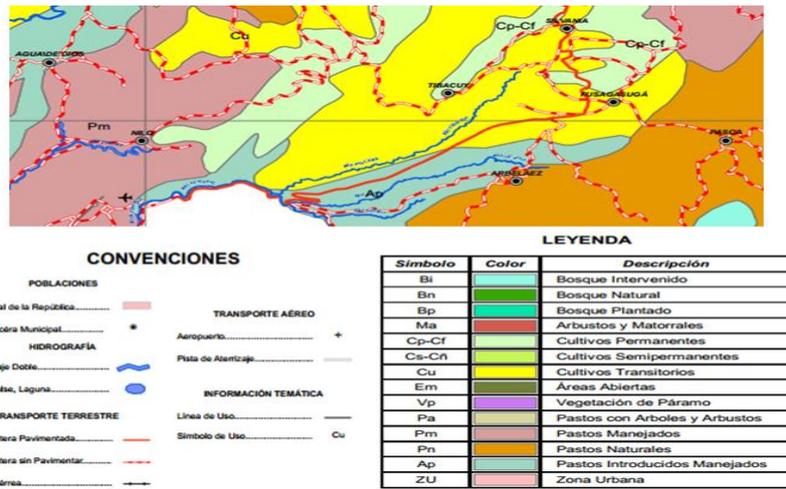


Figura 7. Uso del suelo de Cundinamarca. Fuente: Instituto Geográfico Agustín Codazzi (2004) tomado de la Secretaria de planeación de Cundinamarca (2014)

La población de Tibacuy interviene los ecosistemas de bosque, arbustivo y agrícola, destacando que de 7.770 ha de área rural, son usadas 6.300 ha para la producción agrícola para la satisfacción alimentaria y económica de la comunidad. Los cultivos predominantes son los transitorios y permanentes (Secretaria de Planeación de Cundinamarca 2007). Las veredas en las cuales se desarrolló el estudio fueron Albania, La vuelta, La cajita, San francisco, Chisques y Calandaima con un rango altitudinal de 1350 a 2250 m.s.n.m. (Figura 8).

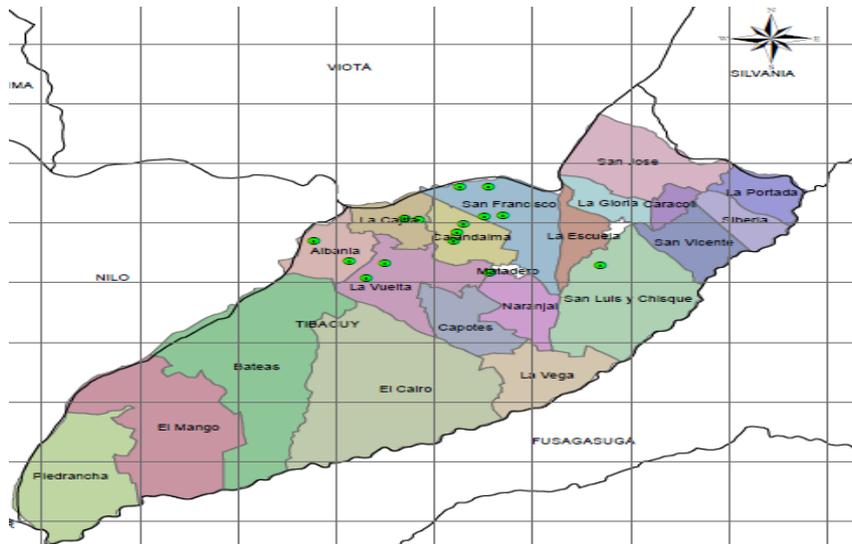


Figura 8. Ubicación de fincas seleccionadas para el estudio de sistemas agroforestales cafeteros Tibacuy Cundinamarca. Fuente: Grupo de Cartografía, proyecto agroforestal de café UDCA. Convenio 9009 de 2014

4.2 Selección y descripción de los sistemas agroforestales cafeteros de Sombra baja, Sombra media y Sombra alta, estudiados.

La selección de fincas con diferente nivel de sombrero se realizó en el marco del Convenio 009 de 2014. Se estudiaron los registros de las fincas cafeteras de Tibacuy dados por la Federación Nacional de Cafeteros, de las cuales se visitaron 45 fincas de café (var. Castillo) en edad productiva de 4 a 8 años. Las 45 fincas se pre categorizaron en niveles de sombrero de acuerdo al número de las especies arbóreas presentes en el área según la clasificación de Federación Nacional de Cafeteros-Comité de Cafeteros de Cundinamarca, 2014, donde se agrupan los sistemas de café con sombra como aquellos con más de 50 árboles/ha y /o más de 750 individuos de especies arbustivas semipermanentes/ha; semisombra entre 20 y 50 árboles por ha y/o entre 300 y 750 individuos de especies arbustivas semi permanentes/ha y sol menos de 20 árboles por ha y/o menos de 300 individuos de especies arbustivas semipermanentes/ha.

De las 45 fincas fueron elegidas al azar 15 fincas, en las cuales se determinó el % de sombra por sistema, teniendo como referencia la apertura del dosel y porcentaje de radiación total por el equipo de investigación en composición florística del Convenio 009 de 2014, para lo cual se tomaron fotografías digitales con lente plano a una distancia de 1,50 m del suelo, 5 fotos por parcela, 4 en el extremo y 1 en el centro. Cuidando que los rayos del sol no incidieran directamente en la lente de la cámara, las fotografías se tomaron en las primeras horas de la mañana o en las últimas horas de la tarde y procesadas en software GLA® (Gap Light Analyzer) teniendo en cuenta el brillo solar y la posición geográfica del municipio de Tibacuy, estos datos se promediaron por parcela.

A partir de los datos obtenidos, los sistemas se categorizaron en tres tratamientos con 5 repeticiones de acuerdo a las tipologías de sombra baja (SB), sombra media (SM) y sombra alta (SA), con rangos de sombra para SA (48 a 70%), SM (21 a 47%) y SB (0 a 12%).

Tabla 1. Sistemas agroforestales cafeteros con diferente nivel de sombrío seleccionados en Tibacuy Cundinamarca.

SAFC	Propietario	% sombra	Vereda	Nombre finca	Altura (m)	Área finca (ha)	Área del café (ha)	Edad
SB	Henry Rodriguez	0	San Francisco	Las Brisas	1546	3,0	2,0	4
	Norvey España	3	La Vuelta	Bélgica	1620	3,8	2,6	6
	Cesar Segura Monrroy	10	Calandaima	La Valentina	1676	4,5	3,0	4
	Otilia Tocua	10	San Francisco	Parcela # 66	1728	3,0	1,0	4
	Fany Murcia	12	La Cajita	Los Reyes	1676	10,3	2,0	6
SM	Luis Gomez	21	Calandaima	Parcela 27	1576	3,0	1,0	4
	Dioved Canacue	22	Calandaima	La Parada	1546	2,9	2,0	5
	Hilda Tocua Burgos	23	San Francisco	Buena Vista	1812	4,0	3,5	4
	Alirio Moreno	38	Albania	La Primavera	1773	7,1	1,5	4
	Jacinta Castillo	47	Albania	Villa Andrea	1746	1,5	1,4	4
SA	Nancy Mendez	48	La Vuelta	La Vuelta	1576	12,0	6,0	4
	Graciliano Rodriguez	53	Calandaima	Las antillas	1613	7,0	6,9	4
	Pedro Liebano	65	Chisque	Tulipan dos	1466	12,8	5,2	4
	Adoralis Rodriguez	66	Gerico	San Lorenzo	1442	3,5	1,5	4
	Saturia Raigoso	70	La Cajita	El paraíso	1622	3,2	3,0	4

SAFC= sistema agroforestal cafetero, Edad= años productivos del cultivo de café.

Fuente: Metodología selección de fincas, Tibacuy-Julio-2014, Convenio 009 de 2014.

La luz transmitida al cultivo de café favorece procesos biológicos e interacciones importantes para la productividad cafetera, sin embargo para el presente estudio se usó el porcentaje de sombra generado por las copas de los árboles en cada parcela. En la selección de los tratamientos cabe resaltar que no siempre la mayor cantidad de árboles genera un nivel de sombrío más alto, debido a características de la copa como la forma, la estructura y la composición de las hojas según la especie arbórea que inciden en la sombra proyectada.

En los sistemas agroforestales cafeteros con diferente nivel de sombrío clasificados por la cantidad de individuos arbóreos y la sombra que estos generaban, se encontró que los sistemas de sombra alta, contaron con abundancia total de 99 individuos/5,000m² de diferentes especies, con mayor abundancia de la especie *Calliandra pittieri* s. conocido como árbol Quiebrajacho, Nogal cafetero *Cordia alliodora* y frutales como los Naranjos *Citrus sinensis* y (27, 22 y 23 individuos/5,000m², respectivamente), reflejando 198 árboles por hectárea (Tabla 2). El sistema sombra media con 74 individuos/5,000m² en el cual había mayor abundancia de Nogal cafetero (13 árboles/ha) y Alguacil ó cucharo colorado (*Myrsine guianensis*) (10 árboles/ha) y representó una abundancia total por

hectárea de 148 árboles, por último en el sistema sombra baja con 21 individuos/ha también se encontró presencia de nogal cafetero, (5 árboles/ha) y naranja (5 árboles/ha) (Anexo 6). Cabe resaltar que la clasificación de sombra baja no se refiere a sistemas cafeteros a libre exposición o pleno sol, la clasificación de los sistemas agroforestales se desarrolló teniendo en cuenta la diversidad de especies intercaladas en el cultivo de café, como maderables, frutales y musáceas a su vez de la sombra generada por el dosel de las especies predominantes en la parcela.

Tabla 2. Abundancia de árboles y musáceas en las áreas de muestreo Tibacuy Cundinamarca.

SAFC	Árboles /ha	Musáceas /ha
Sombra baja	42	156
Sombra media	148	4
Sombra alta	198	110

Fuente: Datos de Enero 2015, análisis de volumen de madera para carbono orgánico almacenado en biomasa, Grupo de florística y grupo de carbono y fisiología de Tibacuy, Convenio 009 de 20014.

Los sistemas sombra alta presentaron especies arbóreas con copas densas y amplias, dispersas en la parcela, se presentaron diferentes estratos de copas por las diferentes alturas de los árboles, arbustos y frutales. Informe de enero 2015 de Composición florística, Convenio 009 de 2014. La hojarasca se encontró en grandes cantidades. En los cafetos en este sistema se evidencio competencia por la luz, presentaron entrenudos más distanciados y diámetros de troncos más delgados.

En los sistemas de sombra media se observó pendiente pronunciada, dando lugar a zonas más densas en presencia de árboles y otras áreas abiertas, de igual modo repercutió en la hojarasca alojada en suelo la cual estaba sectorizada por la presencia arbórea o por las áreas en pendiente donde no se alojaba hojarasca.

Los sistemas sombra baja se caracterizaron por poseer cafetos de porte alto, diámetro de tronco grueso, con alta presencia de hojarasca bajo plantas de café, pero poca hojarasca en las entrecalles del cultivo, debido a la reducida presencia de árboles, en estos sistemas se presentó mayor densidad de plantas de café y en algunas parcelas se observó aprovechamiento de áreas para cultivo de musáceas (Figura 9)

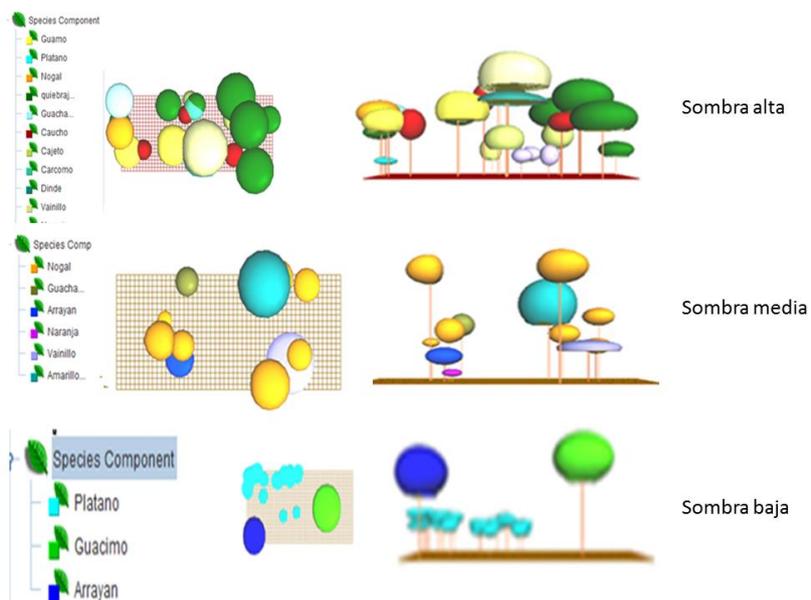


Figura 9. Modelo de distribución arbórea horizontal y vertical en sistemas agroforestales cafeteros en Tibacuy, Cundinamarca. Niveles de sombrío, sombra alta, sombra media y sombra baja. Fuente: Eduar Javier Serrano Orjuela y Dany Daniel Garzón Galvis, Informe Final Composición florística, Convenio 009 de 2014.

4.3. Descripción de las unidades de muestreo

La selección de las unidades de muestreo se hizo en el marco del Convenio 009 de 2014, donde se seleccionaron cinco fincas y dentro de estas un lote por categoría de sombra (alta, media, baja), donde se estableció una parcela de 1000 m² (50 x 20 m), se referencio el Norte como punto de partida, usando brújula y a partir de esto se cerraron los ángulos de la parcela, se rectificaron medidas con GPS y se delimitó con cinta amarilla para la fácil detección de la unidad de muestreo y evitar transformaciones de la misma (Figura 10).



Figura 10. Delimitación de parcelas temporales de 1000m², Tibacuy, Cundinamarca

En la unidad de muestreo de 1000m² se colectaron las muestras de almacenamiento de carbono en necromasas (hojarasca, madera muerta caída y en pie), el carbono orgánico de suelo COS y la respiración de suelo (Figura 11).

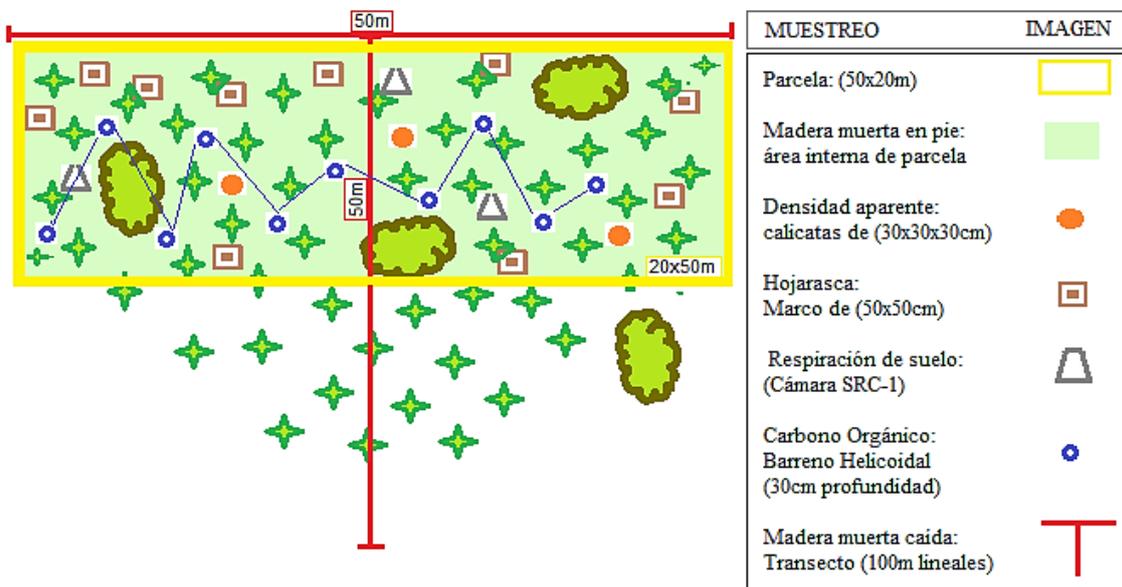


Figura 11. Parcela temporal de muestreo, para estimar almacenamiento de carbono y respiración de suelo, en sistemas agroforestales cafeteros en Tibacuy, Cundinamarca.

4.4. Colectas en campo

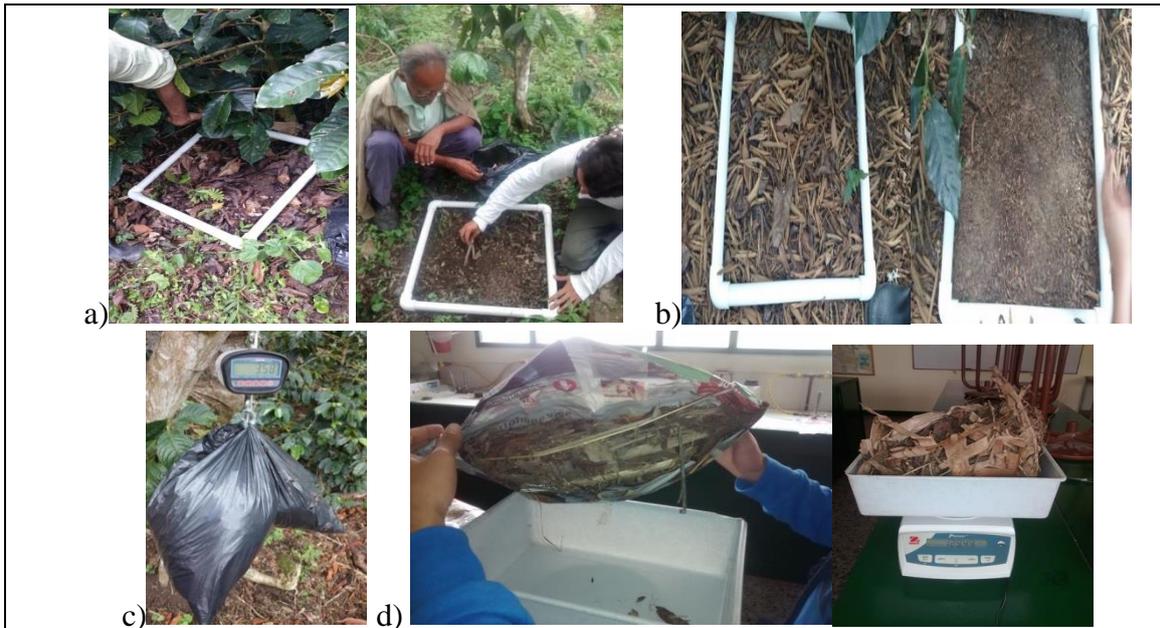
Colectas de necromasa

La necromasa se compone de hojarasca, madera muerta en pie y madera muerta caída. Las colectas de estos materiales se realizaron durante los meses de octubre y noviembre de 2014.

A continuación se describe como se procesó cada una.

Hojarasca

La hojarasca consiste en material muerto de hojas, frutos, flores y ramas pequeñas (diámetro < 10 cm). Para su recolección se usó un marco de 50 x 50 cm para tomar diez muestras de hojarasca al azar en zigzag, cinco bajo plantas de café y cinco entre calles. Se tomó del interior de los marcos el material en descomposición (el material verde se regresó al suelo) (Figura 12).



Recolección de hojarasca bajo plantas de café (a) y entrecalles del cultivo (b); Pesaje de la hojarasca en fresco(c); Secado de la hojarasca en laboratorio y pesaje del material seco (d).

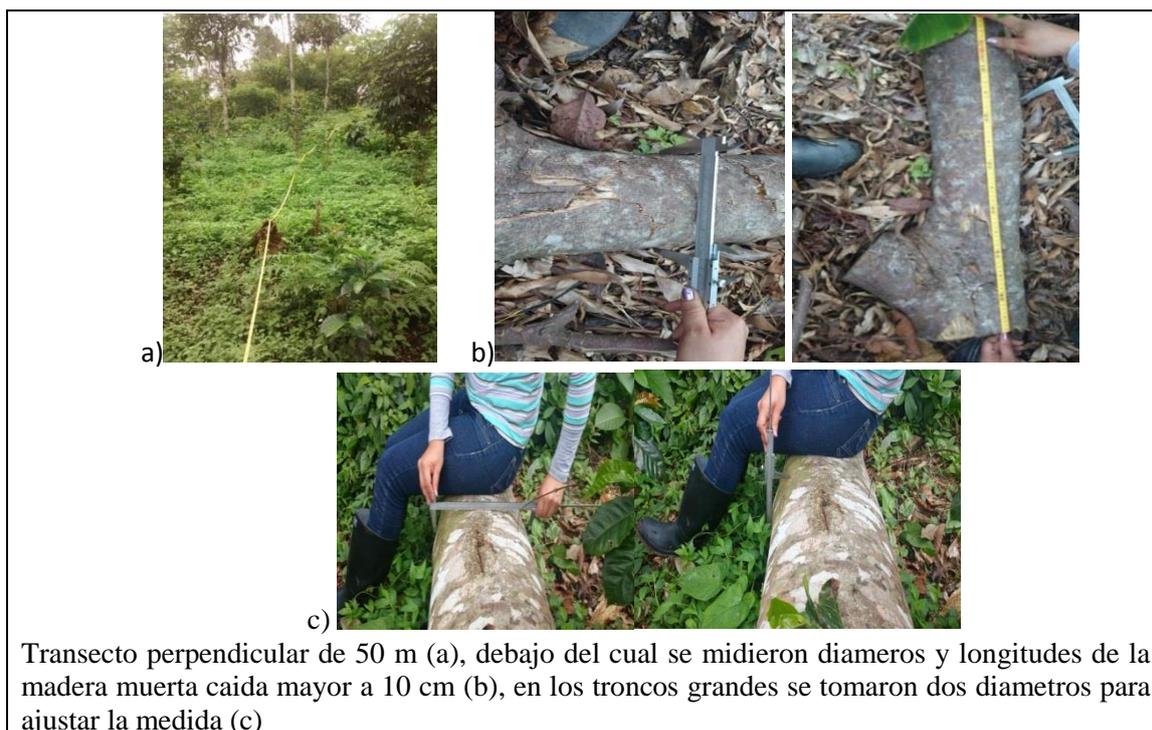
Figura 12. Colecta de necromasa fina, en sistemas agroforestales cafeteros de Tibacuy Cundinamarca.

Para la recolección se evitaron áreas abonadas con la cereza de café, depósitos de vástagos de plátano, aserrín o carbón de madera tanto bajo plantas de café como en las entrecalles del cultivo.

El material de las diez colectas fue unificado, se registró el peso fresco, y se tomó una submuestra de 200 g, las muestras fueron secadas en horno a 65° C hasta peso constante en laboratorio.

Madera muerta caída

La madera muerta caída se midió usando el método de transectos de línea, para esto, se trazaron dos líneas perpendiculares, cada uno de 50 m de longitud, Se usó un transecto vertical para caracterizar la madera muerta caída proveniente de los árboles de la unidad de muestreo como incidentes de materia orgánica en el sistema (Figura 13). La madera caída (troncos o ramas) con diámetro mayor a 10 cm interceptados por la línea se les midió los diámetros y la longitud (Figura 13).



Transecto perpendicular de 50 m (a), debajo del cual se midieron diámetros y longitudes de la madera muerta caída mayor a 10 cm (b), en los troncos grandes se tomaron dos diámetros para ajustar la medida (c)

Figura 13. Medición de madera muerta caída en sistemas agroforestales cafeteros en Tibacuy, Cundinamarca.

Con los datos de longitud y diámetro de la madera muerta caída se estimó el volumen de la pieza de madera usando la siguiente ecuación.

Cuadro 1. Fórmula para hallar el volumen de carbono acumulado en madera muerta caída.

$V = \pi^2 x \frac{(D_1^2 + D_2^2 + \dots + D_n^2)}{8 x L}$	V: volumen (m ³ /ha) D: diámetro de pieza (cm) L: longitud de transecto (m)
---	--

Fuente: van Wagner 1968

Las piezas de madera y fueron golpeadas con un machete para establecer su dureza (suave, media y dura), para relacionar esta característica con la gravedad específica o densidad de la madera, las piezas duras tienen una densidad de 0,6 g/cm³, mientras que de 0,4 y 0,2 g/cm³ para las medias y suaves, respectivamente. Posteriormente, se estimó la biomasa, con el producto del volumen de la pieza por su densidad, usando la siguiente ecuación.

Cuadro 2. Fórmula para hallar biomasa de las piezas de madera muerta caída.

$B = V \times D$	B: biomasa (t) V: volumen (m ³) D: densidad de la pieza (t/m ³)
------------------	---

Fuente: Documento de fisiología y carbono de Tibacuy, Convenio 009 de 2014.

Madera muerta en pie

La madera muerta en pie son troncos muertos que han sido cortados o no y se encuentran anclados en el suelo o árboles muertos recientes y que tienen aspecto vivo. Se realizó un barrido general de la parcela de 1000 m² para medir los diámetros, longitudes y alturas de todos los tocones y árboles muertos (Figura 14).



Figura 14. Medición de madera muerta en pie en Tibacuy, Cundinamarca.

Para detallar el almacenamiento de carbono en la madera muerta en pie, se usó el factor de expansión de biomasa (FEB) que aplica para especies de árboles muertos recientes, con ramas de los cuales no se tiene un modelo específico, a los que se les mide la altura total y la altura del fuste, se realiza una relación 1:1 de la altura del fuste respecto a la copa y se determina la biomasa total. (Cuadro 3)

Cuadro 3. Ecuación de factor de expansión de biomasa

$FEB = \frac{B_t}{B_f}$	FEB: Factor de expansión de biomasa Bt: Biomasa total arriba del suelo Bf: Biomasa de fuste
-------------------------	---

Fuente: Loguercio et al 2001

La biomasa de los árboles recién muertos y que mantienen las condiciones de árbol vivo se estimaron usando modelo alométrico con un factor de corrección de biomasa, que descuenta la fracción de la biomasa inexistente en comparación con uno vivo de la especie y con iguales dimensiones en pie usando el siguiente modelo: (Cuadro 4)

Cuadro 4. Modelo alométrico de biomasa para Nogal

Ejemplo de modelo alométrico de Nogal <i>Cordia alliodora</i> $B = 10^{(-0,51+2,08*\log(dap))}$	B: Biomasa arriba del suelo (kg árbol ⁻¹) DAP: Diámetro del tronco a la altura del pecho (cm)
--	--

Fuente: Segura et al. 2006

Se aplicó el método de cubicación para troncos sin ramificaciones, consiste en tomar las medidas máximas y mínimas de altura, además de tres diámetros del tronco, debido a que son irregulares, se toman: lo más cercano al suelo, lo más cercano a la terminación del corte del tronco y uno al centro, para unificar las medidas como un cilindro



A los tocones regulares(a) se les midió las alturas y los diámetros altos y bajos(b), diferente al tocon irregular al cual, además de medir el diámetro general y las alturas(e), se le midió el diámetro y longitud de cada estructura externa o raíz expuesta(f).

Figura 15. Medición de madera muerta en pie para tocones en Tibacuy, Cundinamarca.

Con los datos de altura y diámetros, se usó la ecuación de cubicación.

Cuadro 5. Ecuación para cubicación.

$B = \left(\frac{\pi}{4}\right) \left(\frac{D_1^2 + D_2^2}{2} - D_3^2 \right) * L * GE$	B: Biomasa arriba del suelo (t árbol ⁻¹) D: Diámetro del tronco cada extremo (m) L: Longitud del tronco (m) GE: Gravedad específica (t m ⁻³)
--	---

Fuente: CDA (2016).

Colectas de carbono orgánico del suelo COS

Para obtener el carbono orgánico de suelo COS se tomaron datos de densidad aparente y porcentaje de carbono orgánico. Las colectas de suelo para densidad aparente se realizaron el día 5 de Noviembre de 2014. La densidad aparente se estimó por medio del método del cilindro de volumen conocido (Andrade & Ibrahim, 2003).

Se seleccionaron 3 puntos de muestreo por parcela de acuerdo a la categoría de sombra, en sistemas de sombra baja se seleccionaron áreas de suelo con poca cobertura arbórea y en sistemas de sombra alta se ubicaron los puntos bajo áreas donde las copas de los

arboles estaban más cerradas. En cada punto se abrió una calicata de 30 cm de profundidad y 30 centímetros de largo y ancho. (30 x 30 x 30 cm), a la mitad de una de las paredes de la calicata (15 cm) se insertó un cilindro de 5cm de altura y 5cm de diámetro. El contenido se extrajo conservando la condición del suelo en un estado natural, y se perfiló quitando excesos de suelo y raíces, no se encontró pedregosidad. Las muestras se depositaron en bolsas rotuladas, por último se llevaron a laboratorio para secarles en horno a 105°C (hasta peso constante) (Figura16).



Figura 16. Colecta de muestras de suelo para densidad aparente en Tibacuy, Cundinamarca.

Con los valores de peso seco de suelo, se estimó la densidad aparente, usando la siguiente ecuación (cuadro 6)

Cuadro 6. Fórmula para estimar densidad aparente del suelo

$Da = \frac{P_{ss}}{V_t}$	Da: Densidad aparente (g/cm ³) Pss: Peso de suelo seco (g) Vt: Volumen interno del cilindro (cm ³)
---------------------------	--

Fuente: Andrade & Ibrahim, 2003

En Tibacuy no se encontró pedregosidad en las muestras extraídas, sin embargo de encontrarse suelos pedregosos se realiza una calicata de 50 x 50 x 50 cm, se extrae todo contenido y se separa el material grueso (diámetro > 2mm) con un tamiz, el cual se descuenta. Las piedras encontradas se depositan en un recipiente previamente aforado y

se estima por desplazamiento de agua. Dato usado en la ecuación de pedregosidad de suelo. (Cuadro 7)

Cuadro 7. Fórmula para estimar porcentaje de pedregosidad de suelo.

$P = \frac{Vfg}{Vc} * 100$	P: Pedregosidad (%) Vfg: Volumen de fragmentos gruesos (dm ³) Vc: Volumen de la calicata (dm ³)
----------------------------	---

Fuente: Andrade & Ibrahim, 2003

Las colectas de suelo para porcentaje de carbono orgánico, se realizaron en el mes noviembre de 2014, por el equipo de suelos convenio 009 de 2014. Se usó el método Walkey Black., se tomaron 10 submuestras de suelo aleatorias en zig-zag, por parcela. Usando el barreno helicoidal a una profundidad de 0 a 30cm, lejos de cercas, postes, árboles, animales o excretas. Estas 10 submuestras se depositaron en un recipiente, fueron homogenizadas para reducir variabilidad y se tomó una muestra compuesta de 500 g, que se llevó al Laboratorio Nacional de Suelos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi –IGAC- para el respectivo análisis.

El valor promedio de densidad aparente encontrado en las 15 fincas de Tibacuy fue utilizado para estimar el contenido de carbono orgánico del suelo usando la masa del suelo y no su volumen ya que la compactación afecta de manera directa este contenido.

Se multiplicó el porcentaje de carbono orgánico por la densidad aparente y el peso seco de la muestra, para estimar el carbono orgánico de suelo usando la siguiente fórmula (Cuadro 8)

Cuadro 8. Ecuación para estimar carbono orgánico del suelo.

$COS = CO * Da * Ps * Fg$	COS: Carbono orgánico de suelo (t/ha) CO: Concentración carbono orgánico en suelos (%) Da: Densidad aparente (g/cm ³) Ps: Profundidad de suelo (cm) Fg: Fragmentos gruesos = 1 – (P/100)
---------------------------	--

Fuente: (Andrade & Ibrahim 2003)

Colectas de respiración de suelo

El procedimiento se llevó a cabo durante los meses de Enero, Junio y Julio del año 2015, se realizó con la cámara de respiración SRC-1 implemento del equipo CIRAS 3.

El equipo registra el CO₂ edáfico liberado y la humedad relativa, además se determinó la temperatura del ambiente y temperatura del suelo mediante un termómetro que funciona anexo a la cámara de respiración de suelo, el termómetro se introdujo al lado del sitio de muestreo.

Se seleccionaron tres sitios de muestreo en suelo, tomando como referencia tres plantas de café representativas de la condición de sombra baja, media y alta. Las mediciones de respiración radicular se realizaron bajo las plantas de café y de respiración microbial en las entre calles aledañas a las plantas seleccionadas (Figura 17).



Figura 17. Colectas de respiración de suelo en Tibacuy, Cundinamarca.

Los intervalos de los muestreo se realizaron en horas de la mañana (9:30 am) empezando por las lecturas bajo la planta, la siguiente en la entrecalle y la última bajo planta. En horas del mediodía (12:30 m) se inició en la entrecalle, seguido de, bajo planta y entrecalle. Por ultimo en horas de la tarde (3:30 pm), se realizó el mismo intervalo de las horas de la mañana, de este modo se conoció la respiración de suelo CO₂/día de la parcela.

El equipo CIRAS3 funciona con valores máximos de control el delta de CO₂ reporta 50 μ moles y el delta de tiempo de 120 segundos, el equipo detiene lectura cuando se llega al tope de estos dos rangos. En el manejo de los datos para determinar la respiración de suelo fue necesario dividir el delta de CO₂ en el delta de tiempo para obtener la respiración por segundo para los sistemas de sombrero en μ moles de CO₂/ s.

Registro de información climática

Por último se analizaron los datos climáticos de la estación meteorológica de la granja la portada Tibacuy de brillo solar y precipitación, facilitados por la Federación Nacional de Cafeteros, para ser comparados con las variables de respiración de suelo.

4.5 Métodos estadísticos

Se empleó un diseño experimental completamente aleatorizado (DCA) con un nivel de confianza del 95%, cuya estructura corresponde a los tres tratamientos de sombra (sistemas agroforestales cafeteros de sombra baja, sombra media y sombra alta) y cinco repeticiones, para un total de 15 unidades experimentales. El factor principal fue el nivel de sombrero y para los sitios de respiración de suelo estuvieron los meses de muestreo.

Modelo

$$y_{ijk} = \mu + S_i + U_j(i) + M_k + q_{ijk}$$

Dónde:

S_i : efecto del nivel de sombrero (efecto del sistema)

$U_j(i)$: error del nivel de sombrero (error aleatorio)

M_k : efecto del mes de muestreo

$(SM)_{ik}$: interacción del nivel de sombrero por mes de muestreo

q_{ijk} : error experimental.

Se establecieron correlaciones entre las variables de almacenamiento de carbono, necromasa y la respiración del suelo, como de las covariables de temperatura de suelo, temperatura ambiente y humedad relativa.

Se realizaron análisis de varianza y pruebas de medias, se probaron los supuestos para el ANDEVA, a partir de estos se determinó si existía o no efecto de los sistemas de sombra sobre cada una de las variables consideradas. Se desarrollaron pruebas de

normalidad y se realizó una transformación a raíz cuadrada de las variables de almacenamiento de carbono y respiración, luego se utilizó análisis de modelos generales y mixtos, considerando como covariables temperatura ambiental, humedad relativa y temperatura del suelo. Para la comparación de las variables mencionadas se usó análisis de componentes principales, los procedimientos de análisis estadístico se realizaron con los software Infostat. Di Rienzo *et al.* (2014) y R (R Core Team, 2015)

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Carbono orgánico almacenado en necromasa en sistemas agroforestales cafeteros de Tibacuy.

El carbono almacenado en hojarasca demostró diferencias altamente significativas entre los tres sistemas evaluados ($p < 0,0001$), debido a la diversidad y abundancia de individuos arbóreos, generando residuos de ramas pequeñas (diámetro $< 10\text{cm}$), flores, hojas y frutos. Se presentó mayor almacenamiento en fincas de sombra alta seguido de sombra baja y sombra media ($4,3 \pm 0,5$, $3,7 \pm 0,5$ y $3,2 \pm 0,8$ t C/ha, respectivamente) (Tabla 3).

La madera muerta caída con diferencias altamente significativas ($p < 0,0001$) presentó mayor concentración en sombra baja, seguido de sombra alta y sombra media ($4,8 \pm 4,4$, $2,3 \pm 2,0$ y $1,9 \pm 1,5$ t C/ha, respectivamente).

La madera muerta en pie presentó diferencias altamente significativas ($p = 0,0003$) con mayor carbono almacenado en el sistema sombra media, seguido de sombra alta y sombra baja ($1,2 \pm 0,5$, $1,0 \pm 0,4$ y $0,7 \pm 0,4$ t C/ha, respectivamente).

El carbono almacenado en la necromasa total (Hojarasca, MMP, MMC) de mayor acumulación se encontró en el sistema sombra baja, seguido de sombra alta y sombra media ($9,3 \pm 4,6$, $7,5 \pm 2,2$ y $6,3 \pm 1,7$ t C/ha, respectivamente). (Tabla 3)

Tabla 3. Carbono almacenado en necromasa en sistemas agroforestales cafeteros en Tibacuy, Cundinamarca.

SAFC	Sombra %	FINCA	Hojarasca t/ha	MMP t/ha	MMC t/ha	Necromasa t/ha	
SB	0	13	5,2	0,0	0,5	5,7	
	3	15	4,2	1,4	1,3	7,0	
	10	11	3,4	1,8	22,4	27,5	
	10	9	2,0	0,0	0,0	2,0	
	12	12	3,8	0,4	0,0	4,2	
			Medías	3,7	0,7	4,8	9,3
			Error estándar	0,5	0,4	4,4	4,6
SM	21	14	4,9	0,3	0,5	5,7	
	22	10	4,7	3,1	0,4	8,2	
	23	6	1,9	1,2	8,1	11,2	
	38	1	1,0	0,0	0,0	1,0	
	47	7	3,4	1,3	0,7	5,4	
			Medías	3,2	1,2	1,9	6,3
			Error estándar	0,8	0,5	1,5	1,7
SA	48	8	5,6	0,0	0,6	6,2	
	53	5	3,7	2,2	10,2	16,1	
	65	4	5,1	1,3	0,3	6,7	
	66	3	4,2	0,6	0,1	4,9	
	70	2	2,7	0,6	0,2	3,6	
			Medías	4,3	1,0	2,3	7,5
			Error estándar	0,5	0,4	2,0	2,2

SAFC= Sistema Agroforestal Cafetero; SB=sombra baja SM=sombra media SA=sombra alta; MMP= madera muerta en pie; MMC= madera muerta caída.

Se presume que la hojarasca del sistema sombra alta pudo provenir en mayor proporción de los árboles del sistema debido a su densidad y abundancia, contrario a la hojarasca presentada en el sistema sombra baja que puede estar relacionada al origen de hojas de cafetos y residuos de musáceas, así mismo por la mayor densidad de siembra de cafetos que implica una reducción en la presencia de árboles.

Los mayores valores de madera muerta caída en el sistema sombra baja respecto a los otros dos sistemas reflejan el aprovechamiento de madera, sin embargo es un dato importante porque confirma que a menor abundancia de árboles, menor es el almacenamiento de carbono convirtiendo a las fincas con menor porcentaje de sombra como fuente de CO₂, lo que reduce su capacidad como sumidero de carbono tanto en suelo como en biomasa. (Figura 18)

La mayor cantidad de necromasa total en el sistema sombra baja se debe a las actividades de manejo como el clareo y corte de fustales, lo cual provocó mayor presencia de restos de madera y tocones en el área. Lo anterior indica la alta relación del almacenamiento de carbono con la materia orgánica generada por los componentes del sistema, teniendo en cuenta que antes del estudio se presentaron estas talas y cortes de madera, en el momento de estudio las parcelas no contaron con transformaciones, pero la tala en estos sistemas tendrán repercusiones en la disminución del carbono orgánico de suelo.

El sistema sombra media tiene el mayor almacenamiento de carbono en madera muerta en pie, lo cual también genera mayor carbono orgánico de suelo debido a la senescencia de las raíces de estos tocones.

El sistema sombra alta presentó valores bajos de almacenamiento de carbono en madera muera caída y madera muerta en pie debido a la normatividad de conservación y prohibición de tala de estos sistemas, lo que deriva una gran diversidad de árboles y por ende se registró la mayor cantidad de carbono almacenado en hojarasca.

Una de las condicionales para el uso maderero en Tibacuy es la protección de las reservas forestales, lo cual impide que se generen mayores cantidades de necromasa en forma de ramas y troncos en sistemas de sombra media y sombra alta, ubicados en predios con mayor altitud. Sin embargo, en el sistema sombra baja se evidenció alta presencia de tocones y restos de madera debido a la orientación productiva del café con mayor exposición a la luz solar donde son cortados y clareados los arboles presentes en estas parcelas.

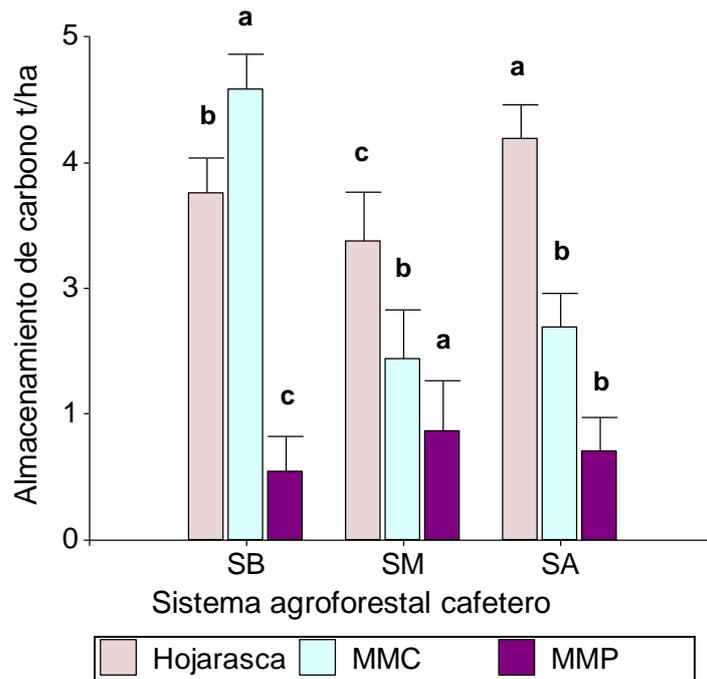


Figura 18 Carbono almacenado en necromasa en sistemas agroforestales cafeteros de Tibacuy Cundinamarca, Colombia. Las barras de error corresponden al error estándar. Las letras indican diferencias estadísticas. SB= sombra baja; SM= sombra media y SA= sombra alta. MMP= madera muerta en pie con ($p=0,0003$); MMC= madera muerta caída con ($p<0,0001$) y Hojarasca ($p<0,0001$)

La hojarasca aportada por el componente leñoso de los sistemas agroforestales de Tibacuy es fundamental para la conservación de la mesofauna de la región, la protección y el aporte de nutrientes al suelo. Así mismo los componentes de la copa aportan materia orgánica al suelo, misma que al degradarse se incorpora paulatinamente y da origen al humus estable (Benjamín, 2001).

La presencia de Guamo (*Inga edulis*) en el sistema sombra baja y sombra media puede estar relacionado con la permanencia de hojarasca de esta especie en el suelo, probablemente debido al grosor de las hojas o por la resistencia química de estas hojas a la humificación, puesto que las características morfológicas, estructurales y químicas de las hojas determinan en buena parte su dinámica de descomposición (Moro & Domingo1996).

El mayor almacenamiento de carbono en necromasa total del sistema sombra baja ($9,3 \pm 4,61$ t C/ha), está asociado a la actividad de tala, lo cual aumenta la cantidad de carbono almacenado en madera muerta caída y reduce la cantidad de árboles en el área lo cual puede conducir a la pérdida de la biomasa y por ende reducción de la calidad de suelo. Según PNUMA (2003) la deforestación se refiere a la remoción de la vegetación

existente en un área determinada. La degradación de la cubierta vegetal se encuentra asociada con el cambio de usos de suelo forestal para otro uso como el pastoreo o cultivos, que resultan en agotamiento del suelo en tres ciclos de cultivo (GEO México 2004) por último la deforestación es uno de los factores que inciden considerablemente en la calidad del suelo y en la capacidad de resistir la erosión hídrica y eólica (SEMARNAT, 2000)

5.2 Carbono orgánico de suelo COS en sistemas agroforestales cafeteros de Tibacuy.

Carbono orgánico del suelo

El Carbono Orgánico del Suelo presentó diferencias altamente significativas ($p < 0,0001$), obteniéndose el mayor almacenamiento de COS en el sistema sombra media, seguido de sombra alta y sombra baja ($182,1 \pm 35,9$; $121,0 \pm 14,4$ y $109,9 \pm 21,1$ t C/ha, respectivamente) (Tabla 4).

Tabla 4. Carbono orgánico de suelo COS en sistemas agroforestales en Tibacuy, Cundinamarca, Colombia.

SAFC	Sombra %	FINCA	COS t/ha
SB	0	13	180,5
	3	15	99,9
	10	11	124,9
	10	9	52,7
	12	12	91,6
		Medias	109,9
	error estándar	21,1	
SM	21	14	108,3
	22	10	97,2
	23	6	222,1
	38	1	194,3
	47	7	288,7
		Medias	182,1
	error estándar	35,9	
SA	48	8	174,9
	53	5	119,4
	65	4	88,8
	66	3	108,3
	70	2	113,8
		Medias	121,0
	error estándar	14,4	

SAFC= sistema agroforestal cafetero; COS= carbono orgánico de suelo

El carbono orgánico de suelo está altamente relacionado con el porcentaje de sombra debido a la presencia y abundancia de especies arbóreas que aportan sombra en el área y actividad radicular en el suelo. El sistema sombra media almacenó menos COS debido a la reducción de árboles debido a la actividad cafetera con mayor exposición a la radiación.

El carbono orgánico de suelo en el sistema sombra media presentó mayor almacenamiento relacionado con la madera muerta en pie y las raíces que permanecen en los tocones, Además está relacionado con la edad y diversidad de las especies. En el sistema sombra media se encontraron (individuos) con edades que oscilan entre los 9 años por lo que la actividad de las raíces, la senescencia y la descarga de carbono por medio de las raíces es mayor (Figura 19). La biomasa del sistema no se tiene en cuenta para el presente estudio pero es importante su contribución al COS, (datos en informes de carbono y fisiología de convenio 009 de 2014)

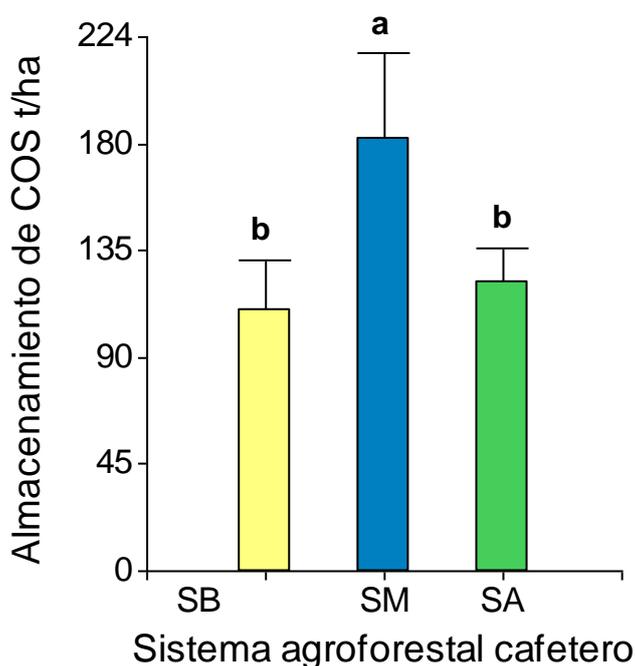


Figura 19 Carbono orgánico de suelo, en sistemas agroforestales con diferente nivel de sombrero en Tibacuy, Cundinamarca, Colombia. SB= sombra baja SM= sombra media SA= sombra alta. Las letras indican diferencia estadística.

Densidad aparente del suelo

La densidad aparente del suelo de Tibacuy no presentó diferencias significativas ($p > 0,05$), la densidad aparente generalizada en el municipio presentó un valor bajo ($0,9 \text{ g/cm}^3$) entre los diferentes niveles de sombrero. El valor de densidad aparente fue mayor en el sistema sombra alta seguido de sombra baja y sombra media ($1,1 \pm 0,1$; $0,9 \pm 0,1$ y $0,8 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$, respectivamente), lo que significa que las características de compactación de suelo son bajas, generando un buen desarrollo radical de los componentes agrícola y forestal en Tibacuy (Tabla 5).

Tabla 5. Densidad aparente del suelo de los sistemas agroforestales estudiados en Tibacuy, Cundinamarca.

SAFC	Sombra %	FINCA	DA (g/Cm3)
SB	0	13	0,6
	3	15	1,0
	10	11	0,9
	10	9	1,1
	12	12	1,0
		Media	0,9
	Error estándar	0,1	
SM	21	14	0,9
	22	10	1,1
	23	6	0,6
	38	1	0,8
	47	7	0,6
		Media	0,8
	Error estándar	0,1	
SA	48	8	1,0
	53	5	0,9
	65	4	1,3
	66	3	1,2
	70	2	1,0
		Media	1,1
	Error estándar	0,1	

SAFC= sistema agroforestal cafetero; DA= densidad aparente

La densidad aparente de Tibacuy indicó la capacidad del suelo de incorporar materia orgánica y el nivel de compactación del suelo, además estuvo relacionado con almacenaje de carbono en los sistemas agroforestales estudiados. En Tibacuy la relación

entre el porcentaje de carbono y densidad aparente a una profundidad de 30cm, tuvo una relación inversa con una confianza de ($R^2=0,66$) lo cual indica que en los sistemas agroforestales de Tibacuy a medida que aumenta la concentración de carbono orgánico disminuye la densidad aparente (Figura 20).

Lo anterior se presentó en sistemas con mayor sombrero donde la densidad aparente fue menor y mayor el COS, contrario a lo encontrado en sistema de sombra baja donde el COS fue menor lo cual indica que es benéfico aumentar la densidad de árboles en sistemas demasiado expuestos a luz solar para mejorar la capacidad del suelo de transformar la materia orgánica y almacenar carbono. En sistemas de producción de café con cultivos intercalados en Naranjal, Chinchiná, se vieron afectadas las propiedades del suelo, donde, la densidad aparente se vio reflejada en una mayor compactación y en la reducción de la capacidad de infiltración del agua en el suelo, lo cual favoreció la escorrentía (Quiroz *et al.* 2007)

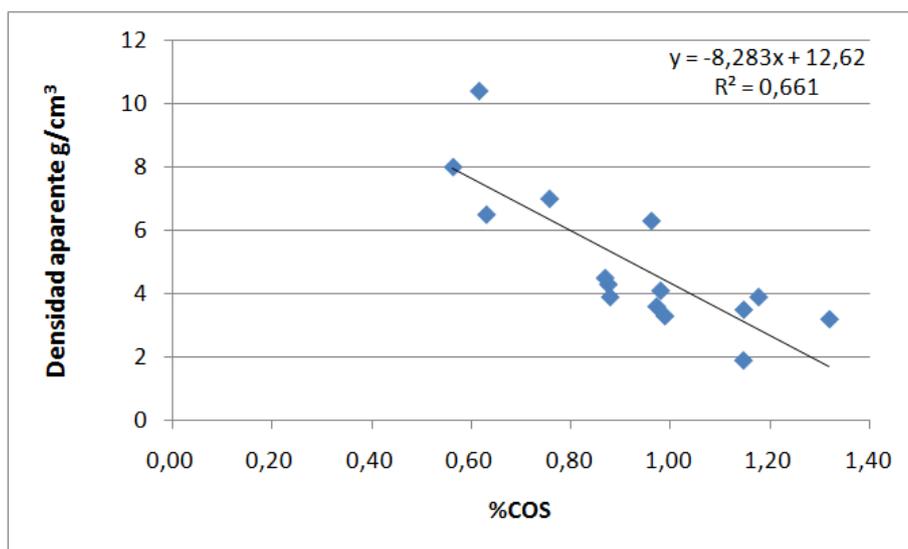


Figura 20. Relación entre la densidad aparente (DA) y la concentración de carbono orgánico del suelo (%) Carbono orgánico de suelo en suelos cafeteros a una profundidad de 0 a 30 cm en Tibacuy, Cundinamarca, Colombia.

Los sistemas agroforestales de Tibacuy demostraron una densidad aparente generalizada para la región, de $0,9 \text{ g/cm}^3$, debido a que el aporte forestal del suelo se da por medio de la materia orgánica, regulando al DA de los sistemas estudiados. La capacidad de los sistemas agroforestales de almacenar carbono puede variar entre 20 y 204 t C/ha,

estando la mayoría de carbono en el suelo, teniendo incrementos de 1,8 y 5,2 t C/ha/año (Ibrahim *et al.* 2005).

Lo anterior indica la gran capacidad de los sistemas agroforestales cafeteros de Tibacuy de almacenar carbono en suelo, debido a la baja compactación de los sistemas de cultivo integrados con árboles ya que a menor densidad aparente existe mayor disposición del suelo de incorporar materia orgánica, almacenar carbono, mantener el COS y mejorar la calidad de suelo. Por lo tanto es beneficio del sistema agroforestal porque permite la entrada de raíces, la aireación del suelo, la permeabilidad y la actividad de los organismos del suelo. Los suelos son grandes almacenes de carbono orgánico e inorgánico, en los suelos con uso forestal se almacena cierta parte del carbono, el cual aumentara a medida que continua el proceso de formación de suelo (Dávila, 2011).

Carbono total almacenado

El carbono orgánico total en todos los compartimientos estudiados en los sistemas agroforestales con diferentes niveles de sombrero, sin contar con la biomasa, presentó mayor almacenamiento en el sistema sombra media seguido de sombra alta y sombra baja (188,4±35, 128,6±14,6 y 119,2±22,9 t C/ha, respectivamente) (Tabla 6)

En los sistemas evaluados se encontró una relación entre el almacenamiento de carbono en suelo y las diferentes necromasas. El sistema sombra media presentó mayor COS (182,1 ± 35,9 t C/ha) respecto a los dos sistemas, además presentó el mayor valor en madera muerta en pie (1,2 ± 0,5 t C/ha) lo cual indica el aporte de las raíces de los árboles muertos a aumento de carbono en el suelo como sumidero de carbono y de la fuerte actividad de la biomasa arbórea, no reportada en el estudio.

Diferente fue el comportamiento en el sistemas de sombra alta con mayor aporte de hojarasca (4,3 ± 0,5 t C/ha) al suelo, pero con un valor de COS (121,0 ± 14,4 t C/ha), menor que del sistema sombra media. Donde la agregación paulatina de la hojarasca aumenta la retención de carbono y mejora la calidad del suelo como sumidero de carbono. Por último en el sistema de sombra la madera muerta caída presentó el mayor valor (4,8 ± 4,4 t C/ha) debido a los claros en el sistema, lo cual indica reducción de árboles en el sistema y por ende disminución en el almacenamiento de COS (109,9 ± 21,1 t C/ha).

Tabla 6 Carbono almacenado en los diferentes compartimientos para cada nivel de sombra de los sistemas agroforestales cafeteros, estudiados en Tibacuy, Cundinamarca.

Carbono orgánico almacenado en compartimientos de necromasa y suelo								
SAFC	Finca	Sombra %	Hojarasca t/ha	MMC t/ha	MMP t/ha	COS t/ha	C Total	
SB	13	0	5,2	0,5	0,0	180,5	186,1	
	15	3	4,2	1,3	1,4	100,0	106,9	
	9	10	2,0	0,0	0,0	52,8	54,7	
	11	10	3,4	22,4	1,8	124,9	152,5	
	12	12	3,8	0,0	0,4	91,6	95,8	
		Medias		3,7	4,8	0,7	109,9	119,2
		Error Estándar		0,5	4,4	0,4	21,1	22,9
SM	14	21	4,9	0,5	0,3	108,3	114,0	
	10	22	4,7	0,4	3,1	97,2	105,4	
	6	23	1,9	8,1	1,2	222,1	233,3	
	1	38	1,0	0,0	0,0	194,3	195,4	
	7	47	3,4	0,7	1,3	288,7	294,1	
		Medias		3,2	1,9	1,2	182,1	188,4
		Error Estándar		0,8	1,5	0,5	35,9	35,8
SA	8	48	5,6	0,6	0,0	174,9	181,1	
	5	53	3,7	10,2	2,2	119,4	135,5	
	4	65	5,1	0,3	1,4	88,8	95,6	
	3	66	4,2	0,1	0,6	108,3	113,2	
	2	70	2,8	0,2	0,6	113,8	117,4	
		Medias		4,3	2,3	1,0	121,0	128,6
		Error Estándar		0,5	2,0	0,4	14,4	14,6
	Total		3,7	3,0	1,0	137,7	145,4	

SAFC= sistema agroforestal cafetero; COS= Carbono orgánico del suelo; Necromasas: MMC= Madera muerta caída; MMP= madera muerta en pie; Hojarasca.

En términos generales, los compartimientos en todos los niveles de sombrero: sombra baja (SB), sombra media (SM) y sombra alta (SA) en los sistemas agroforestales cafeteros estudiados en Tibacuy, demostraron mayor almacenamiento en carbono orgánico de suelo (COS), acumulando entre los tres sistemas el 94,7%, seguido de hojarasca 2,5%, necromasa gruesa (MMP y MMC) 2,6%, sin contar con la biomasa presente en los sistemas (Figura 21).

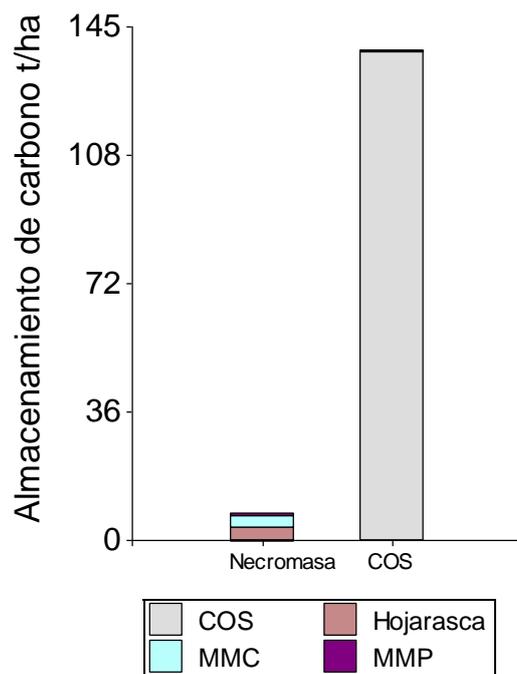


Figura 21 Carbono orgánico almacenado en diferentes componentes en sistemas agroforestales cafeteros, en Tibacuy. COS= Carbono orgánico de suelo; MMP= madera muerta en pie; MMC= madera muerta caída.

Las cantidades de carbono almacenado por tonelada demuestra la gran capacidad del suelo como sumidero de carbono al alojar 137,7 t C/ha de carbono orgánico de suelo COS. En segunda medida, la cobertura del suelo generada por la necromasa gruesa presentó una acumulación de 4 t C/ha y muy cercano a este valor se encontró la hojarasca 3,7 t C/ha, indicando que aunque la necromasa gruesa y fina almacenó menor cantidad de toneladas de carbono, es un compartimiento de interacción con el carbono orgánico de suelo COS.

El carbono orgánico del suelo presentó una mayor acumulación de carbono en el sistema sombra media relacionada a la presencia arbórea del sistema, según Salamanca (2004) la diversidad de árboles permite la presencia de mesofauna del suelo, mejorando también las condiciones de porosidad, retención de la humedad, permeabilidad del agua y penetrabilidad de raíces, por ende una capacidad mayor del suelo de capturar carbono orgánico.

5.3 Respiración de suelo en sistemas agroforestales cafeteros de Tibacuy.

Se encontraron diferencias altamente significativas para la respiración de suelo presentada en los diferentes sistemas de sombra ($p < 0,0004$) donde la mayor liberación se encontró en el sistema sombra media y sistemas sombra baja seguido de sombra alta ($0,96 \pm 0,4$, $0,91 \pm 0,4$ y $0,76 \pm 0,4$ $\mu\text{moles de CO}_2/\text{s}$, respectivamente) (Tabla 5)

La mayor humedad relativa se presentó en el sistema sombra media, seguido de sombra baja y sombra alta ($77,1 \pm 0,6$, $76,0 \pm 1,3$ y $74,4 \pm 1,6$ mbar, respectivamente) con una relación directa con la respiración de suelo, donde a medida que aumentó la humedad relativa la respiración de suelo presentó el mismo comportamiento.

La temperatura de suelo y temperatura ambiente fueron más estables en el sistema sombra media, encontrándose una temperatura de suelo ($18,47 - 19,71^\circ\text{C}$) con fluctuaciones de $1,24^\circ\text{C}$. y temperatura ambiente ($29,13 - 30,40^\circ\text{C}$) con fluctuaciones de $1,27^\circ\text{C}$.

El sistema sombra baja registro menos estabilidad en la temperatura de suelo ($17,86 - 19,91$) con una fluctuación de $2,05^\circ\text{C}$. y temperatura ambiente ($27,79 - 31,64$) con fluctuación de $3,85^\circ\text{C}$ (Tabla 7).

Por último el sistema sombra alta con temperatura de suelo entre $18,56 - 20,41^\circ\text{C}$ con fluctuaciones de $1,85^\circ\text{C}$ y temperatura ambiente entre $27,84 - 30,99^\circ\text{C}$ y fluctuación de $3,15^\circ\text{C}$. Estos resultados indican que la integración de árboles en el sistema sea un mecanismo de mitigación del cambio climático y debido a que los sistemas agroforestales son reguladores de microclimas generando estabilidad térmica gracias a la sombra de las estructuras arbóreas microclima forestal puede entenderse como el conjunto de las especiales condiciones de estado y comportamiento medio o normal que bajo las cubiertas forestales adquieren tanto el suelo como el aire próximo a él, a escalas temporales y espaciales reducidas, claramente desacorde con aquel que se presenta en otros sistemas terrestres colindantes (Gómez, 2004).

Tabla 7. Covariables de respiración de suelo en sistemas agroforestales cafeteros en Tibacuy, Cundinamarca.

SAFC	Sombra %	FINCA	CO ₂ µmoles	Temperatura Ambiente °C	Temperatura Suelo °C	Humedad relativa mbar
SB	0	13	0,8	27,8	17,9	75,0
	3	15	0,8	31,6	19,9	76,0
	10	11	0,8	29,4	18,3	71,8
	10	9	1,3	29,9	19,3	78,5
	12	12	0,9	30,7	19,6	78,9
		Medias	0,9	29,9	19,0	76,0
		Error estándar	0,2	0,9	0,4	1,3
SM	21	14	0,7	29,8	19,3	78,7
	22	10	0,7	29,1	19,7	77,1
	23	6	1,1	29,2	18,5	75,5
	38	1	1,0	29,3	18,8	75,9
	47	7	1,3	30,4	18,9	78,6
		Medias	1,0	29,6	19,0	77,1
		Error estándar	0,2	1,1	0,2	0,6
SA	48	8	1,1	29,8	18,6	69,5
	53	5	0,8	27,8	19,1	75,7
	65	4	0,7	31,0	19,9	74,7
	66	3	0,6	30,3	20,4	73,1
	70	2	0,6	28,8	18,8	79,0
		Medias	0,8	29,5	19,3	74,4
		Error estándar	0,3	0,7	0,3	1,6

SAFC= sistema agroforestal cafetero SA= Sombra alta; SM= Sombra media; SB= Sombra baja.

El sistema sombra media presentó mayor liberación de CO₂ 1,0 ± 0,2 µmoles CO₂, con un valor mayor en la covariable de humedad relativa 77,1 ± 0,6 mbar y menor cantidad de carbono almacenado en hojarasca. La humedad atmosférica es uno de los efectos sobre el reparto energético (no radiante), su aumento sensible, es consecuencia de la continua transpiración de los organismos vegetales, por lo que los flujos de calor se ven afectados (Gómez 2004), cabe resaltar que las fincas de este sistema presentaron pendientes que influyeron el bajo alojamiento de la hojarasca en el suelo, donde también tiene relación con que, La capa superficial de los despojos orgánicos, sobre todo en bosques, genera un efecto aislante energético, tanto de entrada o salida de energía del suelo mineral más profundo (Gómez 2004).

El mayor almacenamiento de carbono en hojarasca (4,3 ± 0,5 t C/ha) se presentó en el sistema sombra alta donde se evidenció la menor liberación de CO₂ y la menor humedad relativa (74,4 ± 1,6 mbar). La conservación de la capa de hojarasca en el suelo

en sistemas agroforestales cafeteros es fundamental para la reducción de las emisiones de gas carbónico edáfico, debido a que estas regulan la temperatura, la humedad relativa e incorporan paulatinamente materia orgánica al suelo. Los resultados de carbono en hojarasca se comparan con estudios en bosques de la reserva de la Biósfera Mariposa Monarca en México de Serrato *et al.* (2014), sobre carbono orgánico almacenado en hojarasca a nivel de horizontes, donde el horizonte F vario entre 8,82 a 35.96 t C ha⁻¹ (Figura 22). Indica la importancia de usar en los sistemas agroforestales especies de gran aporte de necromasa fina.

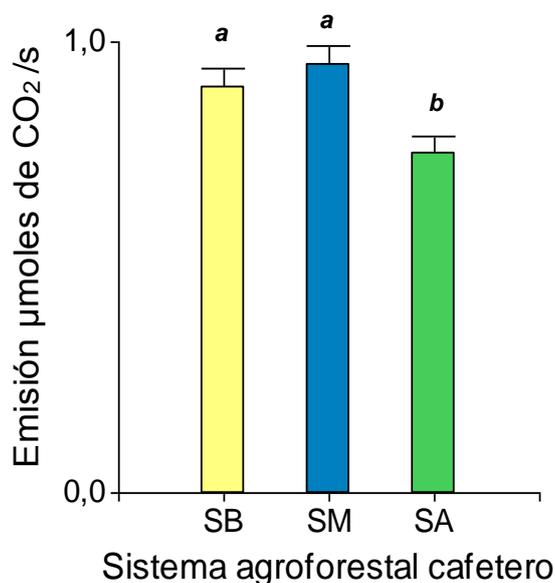


Figura 22. Respiración de suelo en sistemas agroforestales cafeteros de Tibacuy Cundinamarca, Colombia. Las barras de error corresponden al error estándar. Emisión: ($p=0,0046$) Letras diferentes indican diferencias estadísticas. SB= sombra baja; SM= sombra media y SA= sombra alta.

Respiración de suelo durante los meses de medición

En el periodo de Enero se reportaron 96,9 horas de brillo solar, con 156,4 mm de lluvia, en el periodo de Junio descendió tanto el brillo solar (33,6 horas) como la lluvia (49,6 mm), en el periodo de Julio el brillo presento de nuevo descenso a 17,6 horas y la pluviosidad aumento a 98,9 respecto al mes anterior (Figura 23).

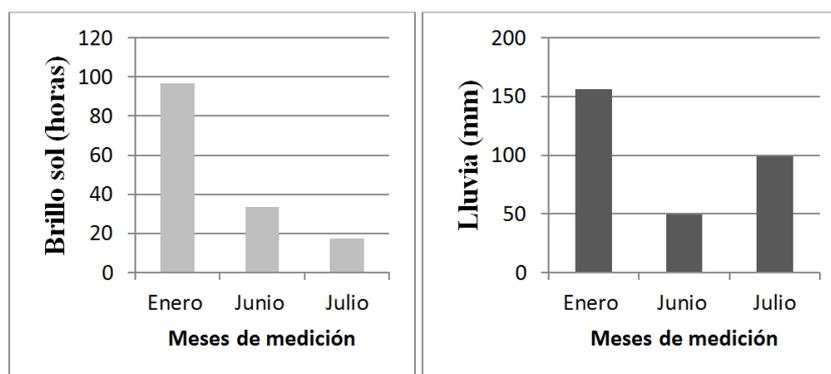


Figura 23. Pluviosidad y horas luz durante las mediciones de respiración de suelo en sistemas agroforestales cafeteros en Tibacuy, Cundinamarca.

Se observó un comportamiento similar entre la respiración de suelo y las horas de brillo solar. En el mes de Enero la respiración del suelo fue mayor que los siguientes dos meses de muestreo, en el sistema sombra baja la respiración de suelo fue más alta seguido de sombra media y sombra alta ($1,21 \pm 0,31$, $1,13 \pm 0,44$ y $0,91 \pm 0,19$ $\mu\text{moles de CO}_2/\text{s}$) respectivamente.

En Junio las horas luz disminuyeron a 33,6 horas y los sistemas agroforestales emitieron menor CO_2 respecto al mes de Enero, el sistema sombra media, seguido de sombra baja y sombra alta ($0,95 \pm 0,22$, $0,84 \pm 0,15$ -vs- $0,79 \pm 0,23$ $\mu\text{moles de CO}_2/\text{s}$). y en el mes de Julio con menor radiación y un aumento de la pluviosidad la respiración de suelo continuo relacionada a la disminución de la radiación solar, donde la respiración de suelo se comportó de la siguiente manera ($0,80 \pm 0,15$ -vs- $0,69 \pm 0,12$ -vs- $0,58 \pm 0,13$ $\mu\text{moles de CO}_2/\text{s}$) para sombra media, sombra baja y sombra alta (Figura 24).

Los tres sistemas presentaron una reacción de mayor emisión de CO_2 ante el aumento del brillo solar, donde el sistema sombra alta se mantuvo por debajo del comportamiento de emisión del sistema sombra media y sombra baja. Cabe resaltar que en la temporada con más brillo solar, el sistema sombra baja fue el que desarrollo mayor respiración de suelo, lo cual indica que los sistemas agrícolas a plena exposición son un factor de riesgo como fuentes de gas carbónico. En la estación Meteorológica de Turrialba, Costa Rica reportados por Forsythe (2002), se encontró mayores gradientes de temperatura mensual ambiental y del suelo cuando se generaron picos de brillo solar altos y de menor gradiente en los bajos de radiación. Por lo que la luz transmitida interviene en las condiciones del suelo y la hojarasca, lo cual genera mayor emisión de CO_2 y sostiene el fundamento de usar especies de cobertura para reducir la respiración de suelo.

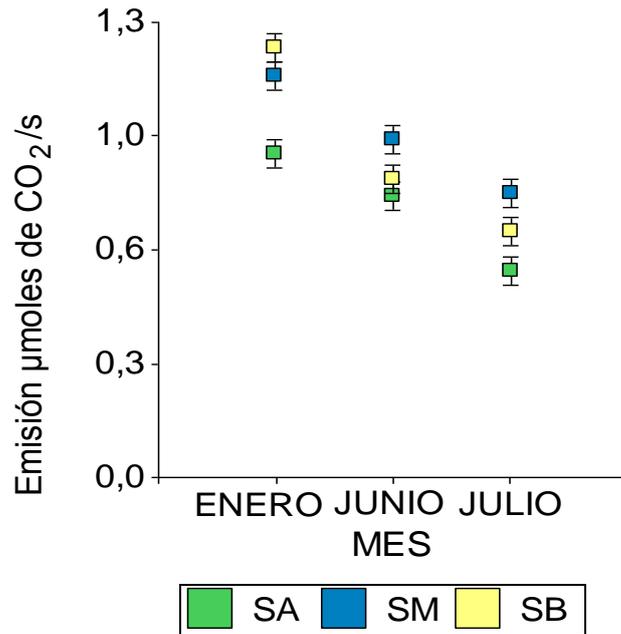


Figura 24. Respiración de suelo durante tres meses en sistemas agroforestales cafeteros en Tibacuy, Cundinamarca. SA: Sombra alta, SM: Sombra media y SB: Sombra baja.

Para el presente estudio la actividad del suelo fue una variable con diferentes interacciones internas que pueden estar relacionadas con la presencia y actividad de los microorganismos, la humedad e inclinación de suelo, la presencia o no de arvenses y el dosel de sombra, entre otros factores que afectaron la temperatura del suelo. Las covariables de temperatura de suelo en Tibacuy se presentaron para el sistema sombra alta entre 0.2 a 0.6°C por encima de los otros sistemas, sin embargo presentó menor respiración de suelo, por lo cual se requiere un mayor avance investigativo de las interacciones mencionadas para contrastar la temperatura de suelo respecto a la respiración en diferentes sistemas agroforestales.

La infiltración redujo la temperatura de suelo ya que en el mes de enero se registró mayor brillo solar pero se evidenció mayor infiltración 156,4mm donde la temperatura del suelo fue de 18,97°C, contrario a lo que sucedió en el mes de junio donde se registró menos lluvia 49,6mm y la temperatura de suelo aumentó 19,05°C. Por lo cual existe una actividad interna en el suelo que genera temperaturas independientes que si pueden estar siendo reducidas por la infiltración.

En los sistemas estudiados los microclimas generados por las coberturas arbóreas ayudaron a disminuir la respiración de suelo, el efecto de la sombra de dosel en la

reducción de la respiración de suelo durante los tres meses se evidencio en el sistema sombra alta lo cual corresponde a lo indicado por Gómez (2004) el balance energético de radiación se ve afectado por la sombra de los arboles pero además el efecto energético se ve alterado por la cubierta vegetal.

La implementación de estos sistemas agroforestales cafeteros de sombra media y sombra alta ayudan a reducir la huella de carbono, al mejorar la estabilidad térmica de los sistemas, con lo que se puede comprobar que la penetración de las fluctuaciones diarias de temperatura alcanzan hasta 20 o 30 cm de profundidad en el suelo (Allen *et al.* 2000). También la temperatura de suelo puede darse seleccionando el manejo de la sombra y el tipo de cobertura (Forsythe, 2002).

Las temperaturas de suelo registradas como menores se generaron en época de alta pluviosidad, por otro lado la reducción de brillo solar no influyo en la temperatura del suelo. La medición de la respiración del suelo es bastante variable y depende de la disponibilidad de sustrato, humedad y temperatura, los microorganismos responden rápidamente a cambios de las condiciones del suelo, por ejemplo, en pocos minutos de rehumedecimiento del suelo sucede aumento de la respiración y mineralización de C y N de la materia orgánica de suelo. Por esta razón cuando se somete a estudio este indicador se dificulta la interpretación (Brookes, 1995). La condición generada en sistema sombra media de mayor almacenamiento de carbono orgánico total y mayor liberación de CO₂ se dio por la presencia de mayor COS, posiblemente por mayor actividad microbial y radicular pero con menor cantidad de hojarasca.

Es necesario generar estudios sobre las condiciones y la respiración de suelo ya que de acuerdo a los análisis de suelo de los sistemas estudiados puede haber una relación entre el % de arena y la liberación de CO₂, debido a que se encontró mayor respiración de suelo en el sistema sombra media en el cual también se encontró mayor % de arena, como se describe a continuación.

En los resultados de granulometría para los tres sistemas se presentó mayor porcentaje de arena en sombra media, seguido por sombra alta y sombra baja (50,2; 44,2 y 41,4% , respectivamente) (Anexo 4), teniendo en cuenta que el sistema sombra media almacenó mayor cantidad de carbono orgánico total $188,4 \pm 35,8$ t C/ha pero registro mayor respiración de suelo $1,0 \pm 0,04$. $\mu\text{moles CO}_2/\text{s}$, y que al ser un compartimiento de alto almacenamiento, este sistema puede liberar cantidades relacionadas de CO₂, sin

embargo y aunque hace falta más análisis de la granulometría esta liberación puede estar relacionada la característica física del suelo con mayor cantidad de arena del sistema.

Mayor porcentaje de limo en el sistema sombra alta, sombra media y sombra baja (33,5, 30,6 y 26,0%, respectivamente) (Anexo 4). El sistema sombra media presentó el mayor almacenamiento de carbono en hojarasca $4,3 \pm 0,5$ t C/ha, el segundo lugar en contenido de COS $121,1 \pm 14,4$ t C/ha y el menor valor de respiración de suelo $0,8 \pm 0,04$ $\mu\text{moles CO}_2/\text{s}$.

Mayor porcentaje de arcilla para sombra baja, sombra alta y sombra media (32,6; 22,3 y 19,2%, respectivamente); el sistema sombra baja presentó menos cantidad de madera muerta en pie debido a la menor cantidad de árboles en estas parcelas lo que reduce la aireación y se evidencian suelos más compactos.

5.4 Relación entre respiración de suelo respecto a carbono almacenado en necromasa y COS.

El mayor almacenamiento de carbono en los sistemas agroforestales cafeteros evaluados se presentó en el sistema sombra media, seguido de sombra alta y sombra baja ($188,4 \pm 35$, $128,6 \pm 14,6$ y $119,2 \pm 22,9$ t C/ha, respectivamente) datos que indican el potencial de los sistemas agroforestales como sumideros de carbono; sin embargo, el sistema sombra media registro un flujo de carbono activo al emitir mayor cantidad de CO_2 $1,0 \pm 0,04$ $\mu\text{moles CO}_2/\text{s}$, resultado muy cercano a la liberación por el sistema sombra baja $0,9 \pm 0,04$ $\mu\text{moles CO}_2/\text{s}$. lo que indica que diferentes factores pueden incidir en la liberación de CO_2 como la temperatura de suelo ya que afecta directamente la actividad de los microorganismos del suelo (FAO 2016).

En los sistemas agroforestales cafeteros de sombra media y alta se encontraron importantes hallazgos de COS lo cual evidencia la alta capacidad del suelo de sistemas agroforestales de café como sumidero de carbono.

Los sistemas de sombra alta almacenaron mayor cantidad de carbono orgánico en hojarasca y liberaron menos CO_2 , dando lugar a que queden detenidos los compuestos de carbono en la lignina de las hojas, por lo cual se entiende que las coberturas arbóreas

tienen una alta implicación en fijación de carbono orgánico en la materia orgánica sobre el suelo (Tabla 8).

Tabla 8. Relación de respiración de suelo y el almacenamiento de carbono en compartimientos de necromasa y suelo

Variable	Sombra baja			Sombra media			Sombra alta			p valor
	Media	E.E.	letra	Media	E.E.	letra	Media	E.E.	letra	
Hojarasca t C/ha	3,7	± 0,5	b	3,2	± 0,8	c	4,3	± 0,5	a	<0,0001
MMC t C/ha	4,8	± 4,4	a	1,9	± 1,5	b	2,3	± 2,0	b	<0,0001
MMP t C/ha	0,7	± 0,4	c	1,2	± 0,5	a	1,0	± 0,4	c	0,0003
C necromasa	9,3	± 4,6		6,3	± 1,7		7,5	± 2,2		
COS t C/ha	109,9	± 21,1	b	182,1	± 35,9	a	121,1	± 14,4	b	<0,0001
C total almacenado	119,2	± 22,9		188,4	± 35,8		128,6	± 14,6		
Respiración de suelo $\mu\text{molesCO}_2/\text{s}$	0,9	± 0,04	a	1,0	± 0,04	a	0,8	± 0,04	b	0,0046

E.E.= Error estándar; MMP= Madera muerta en pie; MMC= Madera muerta caída; COS= Carbono orgánico de suelo; C= carbono almacenado; Letra= diferencia estadística.

De acuerdo con los resultados del sistema SM donde se generaron las menores concentraciones de hojarasca (necromasa fina) 4,29 t/ha y las mayores de COS 187,84 t/ha se evidenció una relación inversamente proporcional en el sistema citado. El Sistema sombra alta presentó la menor liberación de CO₂ aunque no conservó la mayor cantidad de carbono orgánico, evidenció mayor cantidad de hojarasca que protegía al suelo de diferentes factores degradantes, lo cual está asociado a la actividad del COS en el ciclo y disponibilidad de nutrientes. El suelo pierde humus en cultivos convencionales superando la tasa de formación de humus en suelos no perturbados, siendo fuente de CO₂ para la atmósfera (Kern y Johnson, 1993) esto indica que en sistemas con mayor nivel de sombra se reduce la pérdida de materia orgánica importante para el almacenamiento de carbono.

El carbono orgánico de suelo (COS) demostró mayor almacenamiento comparado con las necromasas las cuales acumularon menor cantidad de C. El 4% de carbono de los sistemas agroforestales estudiados correspondió a la necromasa que tiene implicaciones importantes en la inmovilización del CO₂ atmosférico en Tibacuy. Según datos de otras investigaciones, la necromasa general constituye alrededor del 10% total de reserva del carbono aéreo en un bosque natural saludable (REDD+, 2011), También la reserva de carbono de la hojarasca en la selva tropical suele ser aproximada a 5 t/ha, con un

periodo medio de permanencia de un año en la capa de hojarasca (REDD+2011). Además el carbono acumulado en la necromasa es importante para la función del carbono orgánico del suelo y las funciones biológicas del mismo.

El sistema sombra media presentó menor porcentaje de arcilla 19,2% y mayor porcentaje de arena 50,2% (Anexo 4). Lo anterior permite mayor penetrabilidad de las raíces y posiblemente genere aumento de la actividad radicular de los árboles de con edades alrededor de los 9 años encontrados en este sistema, también con la alta liberación de CO₂ en un sistema con alto almacenamiento de COS.

Por otra parte y para fortalecer el suelo la materia orgánica adicionó carbono y protección del suelo, afianzando el principio de la conservación de la calidad de suelo respecto a las condiciones de porosidad, infiltración y penetrabilidad lo cual facilita el crecimiento de estructuras vegetales y presencia de organismos importantes para el ciclo del carbono (Fageira, 2006).

5.4.1. Análisis de componentes principales para la relación entre respiración de suelo, carbono almacenado en necromasa y Carbono orgánico de suelo COS

Se encontró una explicación del 55,1% de la variación del almacenamiento de carbono relacionado a la respiración de suelo.

Las correlaciones se dieron en el factor 1 por las variables, sombra y COS y en menor grado por MMP, hojarasca, CO₂, MMC. Las correlaciones en el factor 2 se dieron por RH y MMP.

En el sistema sombra alta, las variables que presentaron mayor correlación fueron porcentaje de sombra y en menor relacion con MMP y Hojarasca; donde la relación de respiración de suelo se relacionó con la covariable temperatura ambiente (Figura 25).

En el sistema SM las variables de almacenamiento con menor correlación fueron MMP y MMC, y se encontro una correlación directa entre CO₂ y la covariable Humedad relativa, debido al efecto que tiene el aumento de la humedad relativa en el aumento de la respiracion de suelo.

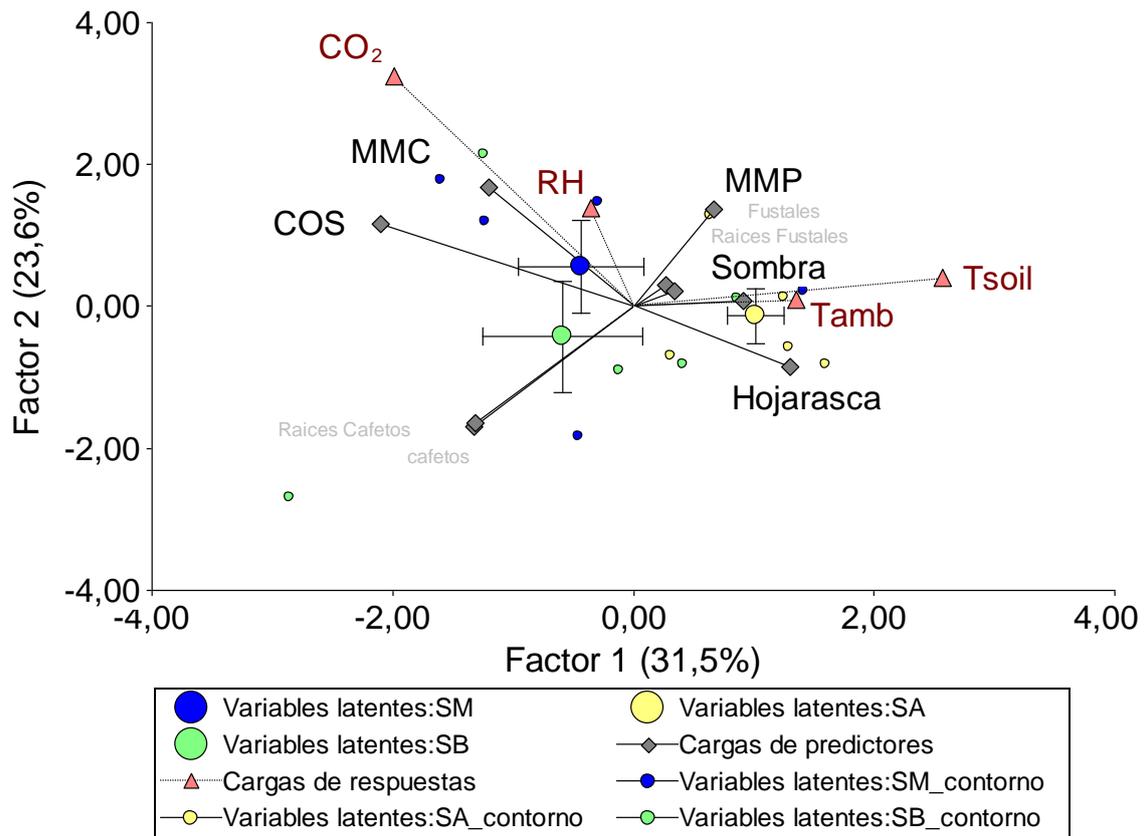


Figura 25. Relación entre almacenamiento de carbono en suelo, necromasa y respiración del suelo en sistemas agroforestales cafeteros en Tibacuy, Cundinamarca. SB=sombra baja SM=sombra media SA= sombra alta; MMP= madera muerta en pie; MMC= madera muerta caída RH= humedad relativa COS=carbono orgánico de suelo Tamb= temperatura ambiente Tsoil= Temperatura de suelo.

El COS presentó baja correlación con la hojarasca, puede estar relacionado a que en mayor proporción el COS del suelo se genera a partir de los residuos del componente arbóreo y sus raíces. Como sugiere Gamarra (2001) encontrando 4,99 t C/ha de contenido de carbono almacenado en hojarasca y 37,39 contenido de carbono en suelo COS en un bosque de *Eucalyptus globulus* Labill, en Junin, Perú con 137.05 toneladas de carbono entre el carbono arriba del suelo y bajo el suelo, donde la fuente de mayor aporte fueron los árboles.

Sin embargo la Hojarasca presentó correlación con la variable de respiración de suelo (CO₂), debido al mayor almacenamiento de carbono en hojarasca y el menor valor de liberación de CO₂ presentado en sombra alta. Aunque la hojarasca permitió la reducción las emisiones de CO₂, se debe generar mayor estudio en la diferenciación de la respiración radicular y microbial del suelo en los sistemas de Tibacuy. Lo anterior

debido a que el flujo de CO₂ teóricamente representa una medición integrada de la respiración de raíces, respiración de la fauna del suelo y la mineralización del carbono desde las diferentes fracciones de la materia orgánica del suelo y del mantillo. Las mediciones también proveen una indicación sensitiva de la respuesta de la actividad microbiana a variaciones de temperatura y humedad, los efectos de humedecimiento – secado, la aplicación de agroquímicos o elementos metálicos, la exudación de sustancias supresoras y el manejo del medio, entre otros (Acuña et al. 2006).

La variable hojarasca demostró correlación con la variable de porcentaje de sombra debido al aporte de necromasa fina de los árboles en el sistema de sombra alta, además tiene correlación con la covariable de temperatura ambiente debido a la regulación de microclimas dados bajo las cubiertas arbóreas, pues existe así un estado de equilibrio entre la distribución vertical del microclima y las características anatómicas y morfológicas de la cubierta, que depende a su vez de las potencialidades de las especies, de la estructura espacial de la masa y de las características del clima general (Ross, 1975). También se presentó una correlación menor entre hojarasca y temperatura de suelo, ya que en este estudio la reducción de la temperatura de suelo dependió más de los eventos de infiltración por lluvia.

La madera muerta en pie sostuvo correlación con la variable de porcentaje de sombra ya que los sistemas presentaron mayor cantidad de biomasa arbórea y por ende mayor cantidad de individuos arbóreos muertos en pie. MMP está en ángulo de correlación a la humedad relativa, sobre el sistema de sombra media ya que en estas fincas se presentó mayor liberación de CO₂, por mayor humedad relativa pero con mayor almacenamiento de COS aportado por la biomasa arbórea viva y por las raíces de la madera muerta en pie.

La madera muerta caída presentó correlación con la respiración de suelo (variable CO₂) debido a la reducción de los árboles en el sistema sombra baja, menor calidad de suelo y mayor pérdida de COS.

De acuerdo a estudios de Gockowski y Sonwa (2011) sobre el carbono almacenado en suelo, registrado a una profundidad de 30 cm en Camerún fue de 43 t C ha⁻¹, menor a las 49 t C ha⁻¹ de SAF cacao de Telemanca, Cerda et al. (2013). valores que fueron menores a los encontrados en Tibacuy donde el total del COS registrado por los tres sistemas de sombra en promedio 137 t C/ha. Lo cual indica que en Tibacuy existe un

alto almacenamiento de carbono orgánico en suelo, también se resalta la importancia de la conservación de las especies maderables en la región y la necesidad de aumentar la biomasa arbórea benéfica para el cultivo de café y genere potenciales efectos en los sumideros de carbono tanto para biomasa como para suelo.

6. CONCLUSIONES

El presente estudio permite comprender como el almacenamiento de carbono orgánico de los sistemas agroforestales con café está relacionado a la abundancia y edad de las especies vegetales ya que son las que generan sombra, barreras que protegen el suelo, incorporan materia orgánica y carbono a través de las raíces, además amortiguan los cambios de las condiciones ambientales lo cual permite el funcionamiento de los compartimientos de carbono del sistema. Se evidencio el efecto de los diferentes niveles de sombrero en el aumento del almacenamiento de carbono y la reducción de la respiración de suelo e los sistemas con mayor proyección de dosel de sombra.

Los sistemas con mayor porcentaje de sombra almacenaron mayor cantidad de carbono en suelo y necromasa y demostraron mayor potencial de mitigación frente al cambio climático al demostrar menor respiración de suelo. En contraste, se demostró que los sistemas agroforestales de baja sombra emitieron más cantidad de CO₂ y almacenaron menores valores de carbono orgánico.

Se encontró una relación directa entre el mayor almacenamiento de carbono en suelo y el mayor valor de carbono almacenado en hojarasca, siendo de vital importancia la cobertura aérea de los árboles como la presencia del lecho de hojarasca para la dinámica del carbono del suelo.

La respiración de suelo presentó una respuesta de liberación de CO₂ a diversos factores medioambientales, así a medida que aumentó la humedad relativa aumentó la liberación de CO₂, la mayor respiración de suelo se presentó en el sistema sombra cuando registro mayor humedad relativa, por lo cual en los sistemas de sobra alta la respiración de suelo fue menor, contrario a esto indica que el dosel de sombra permite reducir el microclima reduciendo las emisiones de gas carbónico.

También se encontró una relación directa con la respiración de suelo y el brillo solar, los tres sistemas agroforestales cafeteros estudiados presentaron mayor respiración de suelo en los meses de más horas luz, esto permite soportar la importancia del dosel de sombra en la reducción de las emisiones, debido a que el sistema sombra alta siempre estuvo por debajo de las emisiones de los sistemas de sombra media y sombra baja.

La relación entre almacenamiento de carbono en suelo, necromasa y respiración del suelo responde a una dinámica de flujos para el ciclo de carbono, donde el carbono almacenado en hojarasca incide en el secuestro del CO₂, superficial del suelo, la presencia de madera muerta en pie está muy relacionada con el COS y la pérdida de materia orgánica por clareo y tala que aumentó la presencia de madera muerta caída en el sistema sombra baja, como el manejo agrícola que impulsará con mayor factor de riesgo la emisión de CO₂.

7. RECOMENDACIONES

Los sistemas agroforestales de sombra media y sombra alta tienden a tener una actividad de respiración microbial y radicular activa al mismo tiempo que almacenan mayor cantidad de carbono orgánico, por lo cual se recomienda sembrar vegetación de cobertura y árboles de alto aporte de hojarasca con el fin de reducir la emisión de CO₂.

Es necesario comparar las condiciones meteorológicas que suceden en la parcela para compararlas con los resultados de respiración de suelo, humedad del suelo, temperatura ambiente y temperatura del suelo, por lo que se recomienda instalar estaciones meteorológicas portátiles en las unidades de muestreo.

Se requiere tomar muestras de suelo de los sitios seleccionados para la respiración de suelo con el fin de compararlos con los elementos menores, el porcentaje de carbono orgánico, la física y química del suelo ya que se demanda un mayor estudio la emisión edáfica comparada con la calidad del suelo.

Se recomiendan estudios más detallados de respiración de suelo en sistemas agroforestales cafeteros, en lo posible realizarlo durante los 12 meses del año, abarcando más horas del día para contrastar con los eventos meteorológicos, la respiración frente a los mismos y realizar correlaciones más precisas.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Acuña, O. Peña, W., Serrano, E., Pocasangre, L., Rosales F.; Delgado, E.; Trejos, J. & Segura, A. (2006) La importancia de los microorganismos en la calidad y salud de los suelos. XVII Reunión Internacional de Asociaciones para la Cooperación, nuevas Investigaciones sobre Banano del Caribe en la América Tropical. Octubre 2006 Santa Catarina, Brasil.
- Aggarwal, P., Choudhary, K., Singh, A. & Chakraborty, D., (2006). Variation in soil strength and rooting characteristics of wheat in relation to soil management. *Geoderma*. 136, 353–363.
- Alvarado, J., Andrade, H., & Segura, M. (2013). Almacenamiento de carbono orgánico en sistemas de producción de café (*Coffea arabica* L) en el municipio de Líbano Tolima, Colombia. *Colombia forestal*, 21-31
- Andrade H. & Ibrahim M. (2003). ¿Cómo monitorear el secuestro de carbono en los sistemas silvopastoriles?, *Agroforestería en las Américas volumen 10*, (109-116)
- Andrade, H. & Segura, M (2008). ¿Cómo construir modelos alométricos de volumen, biomasa o carbono de especies leñosas perennes?. *Agroforestería en las Américas* 46: 89-96.
- Balesdent, J., Mariotti, A. & Guillet, B., (1987). Natural ¹³C abundance as a tracer for studies of soil organic matter dynamics. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 51, 25-30
- Callo-Concha, D. A. (2001). Cuantificación del carbono secuestrado por algunos sistemas agroforestales y testigos en tres pisos Ecológicos de la Amazonia del Perú. Universidad Autónoma Chapingo. *Maestría en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible*. México.
- Bohn, H., McNeal, B. & O'Connor, G. (1979). *Soil chemistry*. New York: J. Wiley, 329 p.
- Brookes, D. (1995) The use of microbial parameters in monitoring soil pollution by heavy metals. *Biology and Fertility of Soils*, Berlin, v. 19, p. 269-279.
- Brown, P., Cabarle, B. & Livernash, R. (1997). Carbon counts: Estimating climate change mitigation in forestry projects. Estados Unidos, World Resources Institute. 25 p.
- Budowski, G. (1993), *Agroforestería: una disciplina basada en el conocimiento tradicional*. *Revista forestal centroamericana*. Vol 2 N°3 p 14-18
- Buyanovsky, G., Aslam M., Wagner G. (1994) Carbon turnover in soil physical fractions. *Soil Sci. Soc. Am J.* 58 p 1169 1173
- Carvajal M. (2010) Investigación sobre la absorción de CO₂ por los cultivos más representativos, Consejo Superior de Investigaciones Científicas CSIC. (p8), España.

- Cerda, R., Espin, T. & Cifuentes, M. (2013) Carbono en sistemas agroforestales de cacao de la Reserva Indígena Bribri de Talamanca, Costa Rica. *Revista Agroforestería de las Américas* N° 49
- Codinza, C. (2006) *Agricultura sostenible*, Sogamoso, Colombia (101) Litografía Géminis Ltda.
- Combe, J. & Budowski, G. (1979). *Clasificación de las técnicas agroforestales*. Taller de sistemas agroforestales en América latina. (p.17-48) Turrialba: CATIE
- Cruz, G., (2013). Variación y Proporción de Varianza de (ROA) regiones océano atmosféricas y (AH) áreas húmedas en años enos con o sin ocurrencia de “Ratadas”, El caso del (BSFS) Bajo San Francisco Sergipano, (NEB) Nordeste De Brasil. *Revista digital de Medio Ambiente “Ojeando la agenda”* ISSN. 1989-6794. N°24-Julio 2013. España. p 28.
- Dávila, H. (2011). *Estimación De La Cantidad De Carbono Almacenado En Los Sistemas Agroforestales de Cacao (Theobroma Cacao L.), En Los Departamentos de Suchitepquez y Retalhuleu del Sur-Occidente De Guatemala*. Universidad de San Carlos De Guatemala. Guatemala.
- Dexter, A., Czyz, E. & GA,TE, O. (2007). A method for prediction of soil penetration resistance. *Soil Till. Res.* 93, 412-419.
- Dirección de Ecosistemas del Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial (2010), *Cartilla de pacto intersectorial de madera legal*, Dosquebradas, Colombia. Publiprint Ltda.,
- Dixon, R. (1994). Carbon Pools And Flux Of Global Forest Ecosystems *Science* 263: 185 -190
- Doran, J. & Parkin, T. (1994). Defining and assessing soil quality. In: Doran, J.W.; Coleman, D.C.;Bezdicek, D. F.; Stewart, B. A. (Org.) *Defining soil quality for a sustainable environment*. Madison: SSSA, 1994. p. 3-21.
- Fageria, N. & Stone L. (2006) *Qualidade do solo e meio ambiente*, Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). ISSN 1678-9644. Santo Antônio de Goiás
- FAO (1998). *La biodiversidad para el Mantenimiento de los Agroecosistemas*. Taller técnico entre la Secretaria del Convenio sobre la Diversidad Biológica con el Apoyo del Gobierno de los Países Bajos, 24 de Diciembre 1998, Roma
- FAO (2002). *Captura de Carbono en los Suelos para un Mejor Manejo de la Tierra*, Tendencia general de la Captura de Carbono en el Suelo,(p15). Francia
- FAO (2002). *Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra*, Informe sobre recursos mundiales de suelo, capítulo 96, ISSN 1020-430-X. Roma
- FAO (2001). *Soil carbon sequestration for improved land management*. World soil reports 96. Rome, p. 58.
- Farfán, F. (2008) *Producción de café en sistemas agroforestales*. Sistemas de producción en Colombia, Capítulo 8 p 165 – 166.

- Farfán, F. (2012). Árboles con Potencial de Ser Incorporados en Sistemas Agroforestales con Café. CENICAFE, p13. Colombia.
- Farfán, F. (2014). Agroforestería y Sistemas Agroforestales con Café. CENICAFE p 298 Manizales Caldas Colombia. BLANECOLOR S.A.S.
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, Centro Nacional de Investigaciones de Café "Cenicafé", Disciplina de Agroclimatología, Archivos Climáticos, Chinchiná, Caldas, Colombia. Septiembre de 2015.
- Ferreira A & Rosim, T. (2007) Indicadores biológicos de qualidade do solo. Biosci. J., Uberlândia, v. 23, n. 3, p. 66-75, July./Sept.
- Fischersworing B. & Robkamp R. (2001) Guía para la Caficultura Ecológica, Editorial Lopez
- FNC Federación Nacional de Cafeteros. (2012). Comportamiento de la Industria Cafetera Colombiana en el 2011. Extraído de {http://www.federaciondefcafeteros.org/static/files/industria_2011.pdf}
- Gamarra, J. (2001) Estimación del contenido de carbono en plantaciones de *Eucalyptus globulus* Labill, en Junin, Perú. Simposio Internacional Medicion y monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales 18 al 20 de Octubre del 2001 Valdivia, Chile.
- Gobbi, J. & Ibrahim, M. (2004). Creating win-win situations: the strategy of paying for environmental services to promote adoption of silvopastoral systems. In L'T Mannelje, L. Ramírez, M. Ibrahim, C. Sandoval, N. Ojeda y J. Ku (eds.), The importance of silvopastoral system in rural livelihoods to provide ecosystem services. Proceedings of the second international symposium on silvopastoral systems (pp. 98-101). Mérida, México: Universidad Autónoma de Yucatán
- Gockowski, J. & Sonwa, D. (2011). Cocoa intensification scenarios and their predicted impact on CO2 emissions, biodiversity conservation, and rural livelihoods in the Guinea rain forest of West Africa. *Environmental Management* 48:307-321
- Gómez, V. (2004) cubiertas forestales y respuesta microclimática, Departamento de Silvopascicultura. EUIT forestal. Ciudad universitaria, s/n 2800 Madrid. España
- Hanson, P.J., Edwards, N.T., Garten, C.T. & Andrews, J.A. (2000). Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observations. *Biogeochemistry* 48: (115-146)
- Haraguchi A., Kojima H., Hasegawa C., Takahashi Y. & Iyobe T., 2002. Decomposition of organic matter in peat soil in a minerotrophic mire. *Eur. J. Soil Biol.*,38, 89-95.
- Hétier, J.M., Andreux, F., Schouller, E. & Marol, C. (1986). Organic matter inputs to soil after growth of carbon-14 – nitrogen-15 labeled maize. *Soil Sci. Soc. A.*, 50, 76-80.
- Holdridge, L. (1947). Determination of World Plant Formations from Simple Climatic Data Science. Volumen 105 n° 2727. 367 – 368

- Ibrahim, M., Chacón, M., Mora J; Zamora, S., Gobbi, J.; Llanderal, T.; Harvey, A.; Murgueitio, E.; Casasola, F., Villanueva, C. & Ramirez, E. (2005). Opportunities for carbon sequestration and conservation of water resources on landscapes dominated by cattle production in Central America. In Henry A. Wallace /CATIE Inter-American Scientific Conference Series, "Integrated management of environment services in human-dominated tropical landscape", Costa Rica, Turrialba, p. 27 -34.
- Ibrahim, M., Chacón, M., Cuartas C., Naranjo, J., Ponce, G., Vega, P., Casasola, F., & Rojas J. (2006) Almacenamiento de carbono en el suelo y la biomasa arbórea en sistemas de uso de la tierra en paisajes ganaderos de Colombia, Costa Rica y Nicaragua, *Agroforestería de las Américas* N° 45
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2003). National Greenhouse Gas Inventories Programme Intergovernmental. Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. En IPCC Good Practice Guidance for LULUCF, Chapter 4: Supplementary Methods and Good Practice Guidance Arising from the Kyoto Protocol, Panel on Climate Change (pp. 113-116). Hayama, Kanagawa, Japón.
- Jackson, M. L., (1964). Análisis químico de suelos (Traducido por J. Beltrán). Ediciones Omega, S. A. Barcelona, España. 662 p.
- Jenkinson, D. & Ladd, J. (1981) Microbial biomass in soil: measurement and turnover. In: Paul, E. y Ladd, J.(Org) *Soil biochemistry*. New York: Marcel Dekker, 1981. P 415-471.
- Jobbagy, E.G. & Jackson R.B.(2000). The Vertical Distribution of Soil Organic Carbon and Its Relations to Climate and Vegetation. *Ecological Applications*. (423- 436
- Johnson, D. W. (1992). Effects of forest management on soil carbon storage. In: *Natural Sink of CO₂*. J. Wisniewski y A. E. Lugo (Eds). Kluwer Academic Publs. Palmas de mar, Puerto Rico. p: 83-120.
- Kern, J. S. & Johnson, M. G. (1993). Conservation tillage impacts on national soil and atmospheric carbon levels. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57, 200-210
- Kuzyakov, Y. (2006). Review: Sources of CO₂ efflux from soil and review of partitioning methods. *Soil Biology & Biochemistry* 38: (425-448).
- Lessart, R., Ginnac, D. & Rochette P. (2010) *Midiendo el flujo del CO₂ del suelo, EL CICLO DEL CARBONO*) Escuela franco-canadiense de Saskatoon, Saskatchewan
- Loguercio, G., Jovanovski M. & Asenjo, E. (2001). Pérdidas de la biomasa en árboles vivos de lenga *Nothofagus pumillo* (poepp. Et Endi) krasser por efecto de las pudriciones de la madera. Un método de cuantificación. Simposio internacional "Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales" 18 al 20 de octubre, 2001. Valdivia, Chile.

- Lundgren, B; & Raintree, JH. (1982). Sustained agroforestry. Nestel, B. (Ed.). Agricultural research for development: potentials and challenges in Asia. The Hague, The Netherlands, ISNAR. p. 37-49.
- Márquez, C., Bechard, M., Gast, F. & Vanegas, H. (2005) Aves Rapaces Diurnas de Colombia, (p348) Bogotá D. C., Colombia: Ramos López Editorial.
- Martin, A., Mariotti, A., Balesdent, J., Lavelle, P. & Vuattoux, R. (1990). Estimate of organic matter turnover rate in a savanna soil by ^{13}C natural abundance measurements. *Soil Biol. Biochem.*, 22, 517-523.
- Martinez, E., Fuentez, J. & Acevedo E. (2008) Carbono Orgánico y propiedades del suelo, Carbono del suelo, Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal. J. Soil Sc. Plant Nutr. 8 (1) (68-96)
- Mcvay, K. & Rice, C. (2002). El carbono orgánico del suelo y el ciclo global del carbono. Carbon series MF-25485, Kansas State University. Estados Unidos.
- Mena, V., Andrade, H. & Navarro, C. (2011). Biomasa y carbono almacenado en sistemas agroforestales con café y en bosques secundarios en un gradiente altitudinales Costa Rica. *Agroforestería Neotropical* 1: 1-20.
- Molnar, A. Scherr, S. & Khare, A. (2004). ¿Quién conserva los bosques del mundo?, Cambios de la acción y la inversión. Condiciones que Facilitan la Conservación Impulsada por las Comunidades (p 47), Washington, Estados Unidos.
- Moro, M. & Domingo, F. (1996) Descomposición de hojarasca en leguminosa *Adenocarpus decorticans*. Pérdida de peso y dinámica de los nutrientes. serie de estudios biológicos, Mediterránea p. 13-19
- Muschler, R. (2000). Árboles en cafetales. CATIE. Turrialba. Colección Módulos de Enseñanza Agroforestal. Módulo No. 5 p. 139
- Nair R. (1985). Classification of Agroforestry Systems. *Agroforestry Systems* (97-128)
- Nair, R. (1997) Definición y Conceptos de Agroforestería, Agroforestería, centro de deAgroforestería para el desarrollo sostenible, Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, México.
- Orrego Alonso, S., Del Valle, J., & Moreno, F. (2003). Medición de la captura de carbono en ecosistemas forestales tropicales de Colombia. Medellín: Universidad nacional de Colombia.
- Ortiz, A. (2006). Almacenamiento Y Fijación De Carbono Del Sistema Agroforestal Cacao (*Theobroma Cacao* L) Y Laurel (*Cordia alliodora*) En La Reserva Indígena De Talamanca, Costa Rica. San Juan de Pasto.
- Pabón J.D (2011) El cambio climático en el territorio de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. Universidad Nacional de Colombia - Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. Bogotá D.C. pag 17
- Penman J. & Gytarsky, M. (2003). Good Practice Guidance for Land-use, Land- use Change and Forestry, PICC: Japón

- PNUMA (2003). Perspectivas del medio ambiente. GEO Programa de naciones unidas para el medio ambiente <http://www.rolac.unep.mx/deselac/esp/html/mapas.htm#severidad>.
- Pumpanen J. et al. (2004) Comparison of different chamber techniques for measuring soil CO₂ efflux Agricultural and Forest Meteorology 123 p159–176
- Quiroz, T. & Hincapié, E.(2007) perdida de suelo por erosión en sistemas de café con cultivos intercalados, Cenicafé 58(3):227-235. 2007.
- Redd+ (2011) Capitulo, medición del carbono de los usos del suelo, estimación de costos de oportunidad de redd+ manual de capacitación.versión 13 pag.3
- ROSS J., (1975). Radiative Transfer in Plant Communities. En MONTEITH J.L. (ed.) Vegetation and Atmosphere. Volume I, Principles. Academic Press. Londres. 13-56.
- Salamaca, A. & Sadeghian, S. (2004). La densidad aparente en suelos de la zona cafetera y su efecto sobre el crecimiento del cafeto. CENICAFE y ISSN-0120-0178.Cinchina Caldas
- Schelesinger W. (1997) biogeochemistry. An analysis of global change academic press San Diego
- Schlesinger W. H. (1990). Evidences from chronosequence studies for low carbon-storage potential of soils. Nature 348: 232-234. Johnson, D. W. 1992. Effects of forest management on soil carbon storage.
- Segura, M; Kanninen, M; & Suárez, D. (2006). Allometric models for estimating aboveground biomass of shade trees and coffee bushes grown together. Agroforestry systems: 68:143–150.
- SEMARNAT (2000) *Indicadores para la evaluación del desempeño ambiental: Reporte 2000*. Instituto Nacional de Ecología-SEMARNAP, México.
- Serrato, R., Adame, S. López J & Flores D. (2014) Carbono orgánico de la hojarasca en los bosques de la reserva de la Biósfera Mariposa Monarca, caso santuario sierra Chincua, México
- Seybold, C. A.; Herrick, J. E. & Bredja, J. J. (1998). Soil resilience: a fundamental component of soil quality. Soil Science, Madison, v.164, p. 224-233, 1998.
- Singer, M.J. & Munns, D.N. (1996). Soils. An introduction. Third edition. Prentice-Hall, Inc. New Jersey. p 480 .
- Six, J., Conant, R.T., Paul, E.A. & Paustian, K. (2002). Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils. Plant and Soil 241, p 155-176.
- Stewart, C., Paustian, K., Conant, R., Plante, A. & Six., J. (2007). Soil carbon saturation: concept, evidence and evaluation. Biogeochemistry, 86, p 19–31.

- Stewart, C., Plante, A., Paustian, K., Conant, R. & Six., J. (2008). Soil Carbon Saturation: Linking Concept and Measurable Carbon Pools. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 72, p 379-392.
- Sullivan, P. (2007) *El Manejo Sostenible del Suelo*, Servicio Nacional de Información de la Agricultura, ATTRA
- USDA(1998) *Soil Quality Test Kit*. Soil Institute (p82) Oregonstate, University Corvallis.
- van Wagner C.E. (1968). The line intersect method in forest fuel sampling. *For. Sci.* 14: 20-26
- Vargas G. (2000) fijación y almacenamiento de carbono en sistemas de café bajo sombra, café a pleno sol, sistema silvopastoriles y pasturas a pleno sol. CATIE, Costa Rica, Turrialba.
- West, T., Marland, G., (2003). Net carbon flux from agriculture: carbon emissions, carbon sequestration, crop yield and land-use change. *Biogeochemistry*, 63, p 73-83
- West, T. & Six, J. (2007). Considering the influence of sequestration duration and carbon saturation on estimates of soil carbon capacity. *Climatic Change*, 80, p 25–41

8.1 CIBERGRAFÍA

- Acuña O; Peña W.; Serrano, E .; Pocasangre, L.; Rosales, F; Delgado, E.; Trejos, J. & Segura, A. 2006. Importance of microorganisms for soils quality and health. (on line). Brasil. Consultado el 10 de septiembre de 2009. Disponible en http://musalit.inibap.org/pdf/IN060651_es.pdf
- Di Rienzo J.A., (2014) Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M., & Robledo C.W. InfoStat versión 2014. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- Ecured (2014), Carbono; Estado Natural Alotropía y Abundancia {<http://www.ecured.cu/index.php/carbono>} Ecuador, Junio 26 de 2014
- Espinoza (2005) Revista Digital del Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias de Venezuela: secuestro de carbono en el suelo (tomado de http://sian.inia.gob.ve/repositorio/revistas_tec/ceniaphoy/articulos/n7/arti/espinoza_y/arti/espinoza_y.htm.) marzo 2014
- FAO (2016) Materia orgánica y actividad biológica Conservación de los recursos naturales para una Agricultura sostenible, recuperado de http://www.fao.org/ag/ca/Training_Materials/CD27-Spanish/ba/organic_matter.pdf 20 de enero de 2016
- CDA (2016).Corporación para el Desarrollo Sostenible del Norte y el Oriente Amazónico. Guía práctica la cubicación de madera recuperado de <http://iniridaguainia.gov.co/apc-aa-files/30616138616630333033656364306431/presentacion-cubicacion-de-maderas.pdf>
- GEO México (2004) Deforestación y cambio en el uso del suelo, *Perspectivas del medio ambiente en México 2004*. ISBN 968-871-4 Mexico DF
- Gobernación de Cundinamarca, Secretaria de Ciencia y Tecnología de Cundinamarca, recuperado de {www.cundinamarca.gov.co/wsp/portal/secdecienytec} fecha 10 de Octubre de 2014
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi –IGAC (2004), Secretaría de Planeación, recuperado de {http://www.cundinamarca.gov.co/wps/portal/home/secretariasentidades.gc/secretariadeplaneacion/secretariadeplaneaciondespliegue/asmapas_contenidos/csecreplanea_mapas_mapasdepart} 22 de junio de 2014

INVEMAR(2014). Figura 1 fuente: recuperado de {<http://www.invemar.org.co/redcostera1/invemar/docs/mec/mapas/hoja18.pdf> }

INVEMAR (2014), leyendas de ecosistemas de mapas de ecosistemas/ infraestructura colombiana de datos especiales (ICDE).recuperado de {<http://www.invemar.org.co/redcostera1/invemar/docs/mec/mapas/leyenda.pdf> } 22 de Junio de 2014.

INVEMAR (2014), mapas de ecosistemas, recuperados de {http://www.icde.org.co/web/guest/invemar_ecosistemas } 22 de junio de 2014.

Peris, M. (2013). El suelo como sumidero de CO₂: mapa de retención de CO₂ de las tierras de labor de los distintos países de la unión europea. Universidad politécnica de valencia. España. Tomado de: <https://ojeandolaagenda.com/2013/07/08/el-suelo-como-sumidero-de-co2-mapa-de-retencion-de-co2-de-las-tierras-de-labor-de-los-distintos-paises-de-la-union-europea/>

R Core Team (2015). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Sattistical Computing, Viena, Austria, tomado de <http://www.r-project.org/>

Sáenz, J. (2012). Reducción y Fijación de CO₂. La fotosíntesis, concepciones, ideas alternativas y analogías. Unidad didáctica dirigida a estudiantes de los ciclos 3 y 4 de educación básica del Colegio José María Carbonell, Universidad Nacional de Colombia. Disponible en: {<http://www.bdigital.unal.edu.co/7577/1/jorgeenriquesaenzguarin.2012.pdf>} Febrero 10 2016.

Secretaria de Planeación de Cundinamarca (2012): mapa hídrico de Cundinamarca, Recuperado de {http://www.cundinamarca.gov.co/wps/portal/Home/SecretariasEntidades.gc/Secretariadeplaneacion/SecretariadeplaneacionDespliegue/asmapas_contenidos/csecreplanea_mapas_mapasdepart }

Secretaria de Planeación, Gobernación de Cundinamarca (2013). División veredal de Tibacuy. División veredal, planes de ordenamiento territorial municipales información de la división político-administrativa suministrada por los municipios. {http://www.cundinamarca.gov.co/wps/portal/Home/SecretariasEntidades.gc/Secretariadeplaneacion/SecretariadeplaneacionDespliegue/asmapas_contenidos/csecreplanea_mapas_mapasdepart }

9. ANEXOS

Anexo 1 Pluviosidad y horas luz durante meses de muestreo. Estación meteorológica Granja la Portada. Tibacuy, Cundinamarca

Mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
2014	Lluvia (mm)	96,9	92,1	178,0	109,9	188,3	62,0	16,7	14,1	137,3	174,3	140,5	80,3
	Brillo sol (horas)	127,4	111,4	97,4	95,1	96,0	93,4	126,4	104,4	125,4	79,0	105,6	148,8
2015	Lluvia (mm)	156,4	113,0	96,1	100,6	94,5	49,6	98,9					
	Brillo sol (horas)	96,9	95,6	261,9	93,6	35,4	33,6	17,6					

Fuente: Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, Centro Nacional de Investigaciones de Café "Cenicafé", Disciplina de Agroclimatología, Archivos Climáticos, Chinchiná, Caldas, Colombia. Septiembre de 2015.

Anexo 2 Elementos menores de los sistemas agroforestales evaluados

SAFC	Sombra %	FINCA	Elementos menores					
			Mn	Fe	Zn	Cu	B	
SB	0	13	1,2	52,5	1,3	0,4	0,5	
	3	15	0,6	199,0	5,1	0,6	0,7	
	10	11	3,7	129,0	3,7	0,7	0,2	
	10	9	9,9	254,0	21,9	2,4	0,3	
	12	12	17,2	134,0	3,8	2,0	0,7	
		Media		6,518	153,7	7,16	1,224	0,5
		Error estándar		3,138	34,17	3,736	0,407	0,1
SM	21	14	9,2	144,0	2,6	1,2	1,1	
	22	10	1,1	437,0	3,7	0,4	0,8	
	23	6	0,3	41,5	2,7	0,2	0,6	
	38	1	1,1	79,0	0,9	0,3	0,4	
	47	7	0,7	51,0	1,1	0,1	0,4	
		Media		2,476	150,5	2,194	0,434	0,7
		Error estándar		1,687	73,83	0,531	0,197	0,1
SA	48	8	3,4	89,2	1,9	0,7	0,5	
	53	5	8,1	117,0	2,5	0,8	0,4	
	65	4	14,9	300,0	8,7	9,6	0,6	
	66	3	11,3	225,0	16,6	3,7	0,8	
	70	2	2,3	233,0	2,2	0,9	0,7	
		Media		8	192,8	6,38	3,116	0,592
		Error estándar		2,368	39,13	2,85	1,718	0,079

Análisis de suelo elementos menores

Anexo 3 Complejo de cambio de suelo de los sistemas agroforestales cafeteros de Tibacuy, Cundinamarca

SAFC	Sombra %	FINCA	Complejo de cambio cmol (+)/Kg						
			CIC	Ca	Mg	K	Na	B.T.	
SB	0	13	47,2	5,5	0,5	0,6	0,1	7,3	
	3	15	30,8	3,7	0,6	0,4	0,1	5,2	
	10	11	33,1	5,1	2,6	0,2	0,1	8,2	
	10	9	26,9	12,0	1,1	0,2	0,1	13,6	
	12	12	22,3	3,1	0,3	0,2	0,1	3,9	
		Media		32,1	5,9	1,0	0,3	0,1	7,6
		Error estándar		4,2	1,6	0,4	0,1	0,0	1,7
SM	21	14	28,8	6,1	0,5	0,6	0,1	7,8	
	22	10	22,9	4,7	0,6	0,3	0,0	6,0	
	23	6	41,4	2,1	0,2	0,3	0,1	2,9	
	38	1	38,7	3,7	0,5	0,3	0,0	4,8	
	47	7	53,3	6,3	0,4	0,3	0,1	7,3	
		Media		37,0	4,6	0,4	0,4	0,0	5,8
		Error estándar		5,3	0,8	0,1	0,1	0,0	0,9
SA	48	8	38,5	12,5	2,2	0,3	0,1	15,3	
	53	5	31,7	10,4	1,7	0,5	0,1	13,2	
	65	4	24,8	14,2	2,8	0,4	0,1	17,9	
	66	3	22,0	9,4	0,7	0,3	0,0	10,7	
	70	2	30,8	2,8	0,3	0,3	0,1	3,8	
		Media		29,6	9,9	1,5	0,3	0,1	12,2
		Error estándar		2,9	2,0	0,5	0,0	0,0	2,4

Anexo 4 Granulometría del suelo de los sistemas agroforestales cafeteros de Tibacuy, Cundinamarca.

SAFC	Sombra %	FINCA	clase textural	Granulometria %		
				Arena	Limo	Arcilla
SB	0	13	FA*	71,9	21,2	6,9
	3,01	15	Ar	25,7	26,4	47,9
	10,01	11	FA*	61,5	27,5	11,0
	10,07	9	Ar	25,6	26,7	47,7
	11,83	12	Ar	22,3	28,2	49,5
			Media	41,4	26,0	32,6
			Error estándar	10,5	1,2	9,7
SM	20,98	14	FAr	37,6	33,1	29,3
	22,32	10	FAr	23,9	40,9	35,2
	22,88	6	FA*	63,1	25,7	11,2
	38,07	1	FA*	59,4	31,7	8,9
	47,12	7	FA*	66,9	21,8	11,3
			Media	50,2	30,6	19,2
		Error estándar	8,3	3,3	5,4	
SA	48,08	8	FA	55,4	35,8	8,8
	53,39	5	FA	57,5	27,4	15,1
	65,06	4	Far	27,9	40,9	31,2
	65,66	3	F	44,6	40,7	14,7
	69,91	2	Ar	35,7	22,7	41,6
			Media	44,2	33,5	22,3
		Error estándar	5,7	3,6	6,1	

FA=franco arenoso; Far= franco arcilloso; F= franco; Ar=arenoso

Anexo 5 Análisis de suelo y materia orgánica de suelo de sistemas agroforestales cafeteros de Tibacuy, Cundinamarca

SAFC	Sombra %	FINCA	pH	A.I.cmol (+)/Kg	S.A.I. %	salinidad CE (dS/m)	C.O. %	SB%	S	fosforo disponible mg/Kg
SB	0	13	5	1,2	14,1	0,1	6,5	15,5	3	7,4
	3	15	4,1	7,8	60,1	0,2	3,6	16,8	1,7	13,9
	10	11	5,3	0,16	1,9	0,2	4,5	24,8	6,9	19,5
	10	9	5,1	0,21	1,5	0,2	1,9	50,7	4,8	7,1
	12	12	4,2	3	43,3	0,3	3,3	17,6	3,7	17,9
SM	21	14	4,3	3,4	30,3	0,8	3,9	27,2	13,2	23
	22	10	4,1	3	33,4	0,4	3,5	26,2	4,1	22,5
	23	6	4,6	4,2	59,2	0,2	8	7	3,1	5,7
	38	1	4,8	2,4	33,3	0,5	7	12,4	1,4	10,2
	47	7	4,7	2,3	24	0,2	10,4	13,6	2,8	10,1
SA	48	8	5,2	0,28	1,8	0,2	6,3	39,8	8,5	42,2
	53	5	5	0,8	5,7	0,2	4,3	41,6	5,8	14,5
	65	4	5,1	0,21	1,2	0,4	3,2	72	2,7	43,8
	66	3	4,9	0,69	6	0,4	3,9	48,8	4,8	169
	70	2	3,8	8,6	69,6	0,4	4,1	12,2	4,1	15,7

SB= Porcentaje de saturación de bases; SAI= Porcentaje saturación acidez intercambiable;
C.O= concentración de carbono orgánico

Anexo 6 Inventario forestal en área de estudio en el municipio de Tibacuy, Cundinamarca

SAFC	Especies Arbóreas	Abundancia por especie Individuos/ha	Abundancia total Individuos/ha
SA	<i>Albizia carbonaria b.</i>	1	99
	<i>Alchornea grandiflora m.</i>	1	
	<i>Caliandra pittieri s.</i>	27	
	<i>Citrus sinensis</i>	23	
	<i>Cordia alliodora</i>	22	
	<i>Cupania americana</i>	1	
	<i>erythrina poeppigiana</i>	1	
	<i>Ficus gigauntosyce d</i>	3	
	<i>Inga edulis</i>	10	
	<i>Maclura tinctoria</i>	1	
	<i>Mangifera indica</i>	1	
	<i>Myrcia cucullata o.</i>	1	
	<i>Senna spectabilis</i>	4	
	<i>Trichanthera Gigantea</i>	3	
SM	<i>Cedrela montana</i>	4	74
	<i>Myrsine guianensis</i>	10	
	<i>Pittosporum undulatum</i>	5	
	<i>Prunus integrifolia</i>	2	
	<i>Ficus gigauntosyce d</i>	2	
	<i>Myrsine coriacea</i>	2	
	<i>Guettarda crispiflora v.</i>	1	
	<i>Aiouea dubia</i>	3	
	<i>Psidium guajava</i>	3	
	<i>Maclura tinctoria</i>	1	
	<i>Fraxinus chinensis</i>	3	
	<i>Tabebuia rosea</i>	1	
	<i>Cordia alliodora</i>	13	
	<i>Citrus sinensis</i>	6	
	<i>Alchornea grandiflora m.</i>	2	
	<i>Zanthoxylum monophyllum</i>	1	
	<i>Inga edulis</i>	2	
	<i>persea americana</i>	5	
	<i>Trichanthera Gigantea</i>	2	
	<i>Senna spectabilis</i>	2	
	<i>Platymiscium hebestachyum benth</i>	1	
<i>Cupania americana</i>	1		
<i>Myrcia cucullata o.</i>	1		
<i>Aiouea dubia Laurel</i>	1		
SB	<i>Senna spectabilis</i>	1	21
	<i>Citrus sinensis</i>	5	
	<i>Psidium guajava</i>	1	
	<i>Inga edulis</i>	1	
	<i>Cordia alliodora</i>	5	
	<i>persea americana</i>	2	
	<i>Myrcia cucullata o.</i>	1	
	<i>Guazuma ulmifolia lam.</i>	1	
	<i>Pittosporum undulatum</i>	1	
	<i>Trichanthera Gigantea</i>	1	
<i>Myrsine coriacea</i>	2		

Fuente: Javier Serrano y Daniel Garzón, Grupo de Caracterización florística, a la fecha de enero de 2015 y confirmado con el grupo de carbono y fisiología Municipio de Tibacuy Convenio N. SCTel 009 de 2014.

Anexo 7 Autovalores de componentes principales para las variables de almacenamiento de carbono y respiración de suelo

Autovalores			
Lambda	Valor	Proporción	Proporción Acumulada
1	3,18	0,32	0,32
2	2,22	0,22	0,54
3	1,91	0,19	0,73
4	1,01	0,1	0,83
5	0,86	0,09	0,92
6	0,46	0,05	0,96
7	0,3	0,03	1,00
8	0,05	4,60E-03	1,00
9	2,50E-03	2,50E-04	1,00
10	3,60E-04	3,60E-05	1,00

Anexo 8 Autovectores de componentes principales para las variables de almacenamiento de carbono y respiración de suelo

Autovectores		
Variables	e1	e2
CO ₂	-0,04	0,5
% Sombra	0,36	-0,12
cafetos t/ha	-0,44	-0,28
Fustales t/ha	0,43	-0,24
Hoja t/ha	-0,3	-0,18
MMC t/ha	-0,06	0,5
MMP t/ha	0,04	0,4
Raices Cafetos t/ha	-0,44	-0,27
Raices Fustales t/ha	0,45	-0,24
COS t/ha	-2,70E-03	0,17

Anexo 9 Valores de contraste de componentes principales

SAFC	Finca	% Sombra	CP 1	CP 2
SB	13	0	-4,4	-2
SB	15	3	-0,3	0,62
SB	9	10	-0,6	-0,4
SB	11	10	-1,3	3,44
SB	12	12	0,58	-1,1
SM	14	21	-1,9	-1,4
SM	10	22	-0,4	0,7
SM	6	23	1,13	0,81
SM	1	38	1,92	0,72
SM	7	47	0,05	1,24
SA	8	48	-0,5	-0,1
SA	5	53	0,47	1,38
SA	4	65	0	-0,4
SA	3	66	1,6	-1,7
SA	2	70	3,41	-1,9

Anexo 10. Análisis de modelos lineales generales y mixtos para hojarasca.

C.almacenado.Hojarasca.t.ha - Medias ajustadas y errores estándares para SAF

LSD Fisher (Alfa=0,05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

SAF	Medias	E.E.	
SA	4,29	0,11	A
SB	3,71	0,11	B
SM	3,19	0,11	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	3734,96	<0,0001
SAF	2	26,90	<0,0001

Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	3734,96	<0,0001
SAF	2	26,90	<0,0001

Pruebas de hipótesis tipo III - prueba

	numDF	denDF	F-value	p-value
1 SAF	2	402	26,90	<0,0001

Anexo 11. Análisis de modelos lineales generales y mixtos para madera muerta en pie.

MMP.t.ha - Medias ajustadas y errores estándares para SAF				
<i>LSD Fisher (Alfa=0,05)</i>				
<i>Procedimiento de corrección de p-valores: No</i>				
SAF	Medias	E.E.		
SM	1,17	0,08	A	
SA	0,95	0,08	B	
SB	0,73	0,08	C	
<i>Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)</i>				
Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)				
	numDF	F-value	p-value	
(Intercept)	1	471,18	<0,0001	
SAF	2	8,35	0,0003	
Pruebas de hipótesis secuenciales				
	numDF	F-value	p-value	
(Intercept)	1	471,18	<0,0001	
SAF	2	8,35	0,0003	
Pruebas de hipótesis tipo III - prueba				
	numDF	denDF	F-value	p-value
1 SAF	2	402	8,35	0,0003

Anexo 12. Análisis de modelos lineales generales y mixtos para madera muerta caída.

MMC.t.ha - Medias ajustadas y errores estándares para SAF				
<i>LSD Fisher (Alfa=0,05)</i>				
<i>Procedimiento de corrección de p-valores: No</i>				
SAF	Medias	E.E.		
SB	4,82	0,50	A	
SA	2,27	0,50	B	
SM	1,93	0,50	B	
<i>Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)</i>				
Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)				
	numDF	F-value	p-value	
(Intercept)	1	106,65	<0,0001	
SAF	2	9,82	0,0001	
Pruebas de hipótesis secuenciales				
	numDF	F-value	p-value	
(Intercept)	1	106,65	<0,0001	
SAF	2	9,82	0,0001	
Pruebas de hipótesis tipo III - prueba				
	numDF	denDF	F-value	p-value
1 SAF	2	402	9,82	0,0001

Anexo 13. Análisis de modelos lineales generales y mixtos para carbono orgánico de suelo.

COS.t.ha - Medias ajustadas y errores estándares para SAF					
<i>LSD Fisher (Alfa=0,05)</i>					
<i>Procedimiento de corrección de p-valores: No</i>					
SAF	Medias	E.E.			
SM	182,12	4,40	A		
SA	121,05	4,40	B		
SB	109,94	4,40	B		
<i>Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)</i>					
Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)					
	numDF	F-value	p-value		
(Intercept)	1	2943,79	<0,0001		
SAF	2	78,17	<0,0001		
Pruebas de hipótesis secuenciales					
	numDF	F-value	p-value		
(Intercept)	1	2943,79	<0,0001		
SAF	2	78,17	<0,0001		
Pruebas de hipótesis tipo III - prueba					
	numDF	denDF	F-value	p-value	
1	SAF	2	402	78,17	<0,0001

Anexo 14. Análisis de modelos lineales generales y mixtos para respiración de suelo.

RAIZ_CO2 - Medias ajustadas y errores estándares para SAF			
<i>LSD Fisher (Alfa=0,05)</i>			
<i>Procedimiento de corrección de p-valores: No</i>			
SAF	Medias	E.E.	
SM	0,93	0,05	A
SB	0,93	0,05	A
SA	0,84	0,05	B
<i>Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)</i>			

Anexo 15. Análisis de modelos lineales generales y mixtos para respiración de suelo, pruebas de hipótesis.

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)				
	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	351	449,81	<0,0001
SAF	2	351	5,47	0,0046
Mes	2	0	1,72	
Hora	2	0	0,23	
sitio	1	0	0,05	
SAF:Mes	4	351	0,86	0,4894
SAF:Hora	4	351	0,57	0,6863
SAF:sitio	2	351	1,20	0,3017
Mes:Hora	4	0	0,02	
Mes:sitio	2	0	0,01	
Hora:sitio	2	0	0,16	
SAF:Mes:Hora	8	351	0,74	0,6560
SAF:Mes:sitio	4	351	0,66	0,6229
SAF:Hora:sitio	4	351	1,08	0,3679
Mes:Hora:sitio	4	0	0,01	
SAF:Mes:Hora:sitio	8	351	0,65	0,7357
Pruebas de hipótesis secuenciales				
	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	351	450,10	<0,0001
SAF	2	351	10,14	0,0001
Mes	2	0	1,76	
Hora	2	0	0,23	
sitio	1	0	0,05	
SAF:Mes	4	351	1,84	0,1205
SAF:Hora	4	351	1,06	0,3749
SAF:sitio	2	351	0,51	0,6037
Mes:Hora	4	0	0,03	
Mes:sitio	2	0	0,01	
Hora:sitio	2	0	0,16	
SAF:Mes:Hora	8	351	0,85	0,5604
SAF:Mes:sitio	4	351	0,79	0,5304
SAF:Hora:sitio	4	351	1,10	0,3543
Mes:Hora:sitio	4	0	0,01	
SAF:Mes:Hora:sitio	8	351	0,65	0,7357
Pruebas de hipótesis tipo III - prueba				
	numDF	denDF	F-value	p-value
1 SAF	2	351	5,47	0,0046
2 Mes	2	0	1,72	
3 Hora	2	0	0,23	
4 sitio	1	0	0,05	
5 SAF:Mes	4	351	0,86	0,4894
6 SAF:Hora	4	351	0,57	0,6863
7 SAF:sitio	2	351	1,20	0,3017
8 Mes:Hora	4	0	0,02	
9 Mes:sitio	2	0	0,01	
10 Hora:sitio	2	0	0,16	
11 SAF:Mes:Hora	8	351	0,74	0,6560
12 SAF:Mes:sitio	4	351	0,66	0,6229
13 SAF:Hora:sitio	4	351	1,08	0,3679
14 Mes:Hora:sitio	4	0	0,01	
15 SAF:Mes:Hora:sitio	8	351	0,65	0,7357

Anexo 16. Descripción equipo CIRAS3

El equipo CIRAS3 Sistema de Fotosíntesis Portable (PP SYSTEMS), cuenta con una consola para la manipulación de las configuraciones, en la parte posterior contiene los químicos y conexiones de implementos, necesarios para receptor el CO₂ liberado del suelo.

Este equipo contiene Soda lima (NaOH) que elimina el CO₂ del aire que entra al equipo, Dierite (sulfato anhidro, sulfato de calcio y cloruro de cobalto) absorbe el H₂O del aire externo y Por último el Tamiz molecular, encargado de filtrar el CO₂ y H₂O e indicar el comportamiento de las moléculas en el proceso de muestreo.

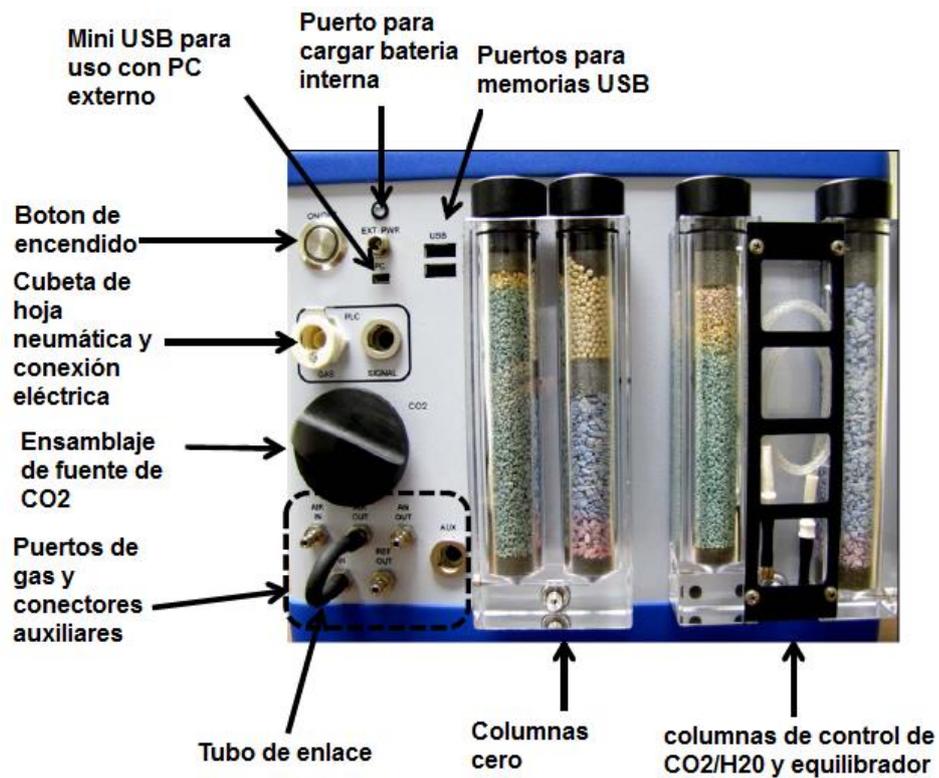
La cámara de respiración de suelo es cilíndrica, con un anillo para la inserción en terreno, tiene conexiones hidráulicas que permitirán la absorción del CO₂ liberado, de acuerdo a un intervalo de 50CO₂max y 120segundos de Tiempo Max, al cumplirse los parámetros de registro finaliza la secuencia de medición. Anexo a la cámara se usa una termómetro de suelo que se inserta al lado del sitio de muestreo.

Los resultados serán el delta³ de CO₂, temperatura del ambiente y del suelo.

El anillo de soporte de la cámara debe insertarse completamente en el suelo para evitar ingreso de aire, fugas del CO₂ de la consola y del suelo, se tomaran las muestras con hojarasca superficial presente, evitando sitios donde la hojarasca sea muy gruesa que

³CO₂ diferencial (μmol mol⁻¹)

impida la inserción del anillo de la cámara en el suelo. Se recomienda no usar el equipo CIRAS3 en condiciones de lluvia o alta humedad.



Descripción de Componentes del Equipo CIRAS3 tomado del Manual de uso del equipo elaborado por el grupo de carbono y fisiología del convenio 009 de 2014

Anexo 17. Acompañamiento social por parte de los caficultores de Tibacuy, en la investigación de dinámica de carbono orgánico de suelo en los sistemas agroforestales cafeteros.



Investigación activa con los caficultores de Tibacuy, se les enseñó el manejo y uso del equipo CIRAS3 y las diferentes metodologías para estimar el carbono orgánico almacenado en los compartimientos de los sistemas agroforestales cafeteros. Se resaltó la importancia de la reducción de la respiración de suelo para la mitigación del cambio climático y mejorar la adaptación de los sistemas acafeteros a los comportamientos del clima. Además de generar una participación investigativa en la búsqueda de pagos por servicios ambientales y reducción de la huella de carbono en la agricultura.

Anexo 18. Características de los sistemas agroforestales cafeteros de Tibacuy, Cundinamarca



Sistema sombra baja



Sistema sombra media



Sistema sombra alta



Inclinación de terrenos



SAFC integrado con platano en Tibacuy