FORMAS DE CARBONO ORGÁNICO EN SUELOS DE USOS DIFERENTES AL NORTE DEL DEPARTAMENTO DEL MAGDALENA

MARIA FERNANDA LEÓN LINERO
MERCEDES ELENA PALOMINO DIAZ

UNIVERSIDAD DEL MAGDALENA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA
SANTA MARTA D.T.C.H.
2014

FORMAS DE CARBONO ORGÁNICO EN SUELOS DE USOS DIFERENTES AL NORTE DEL DEPARTAMENTO DEL MAGDALENA

MARIA FERNANDA LEÓN LINERO
MERCEDES ELENA PALOMINO DIAZ

Proyecto de investigación presentado como requisito para optar al título de:
Ingeniera Ambiental y Sanitaria

DIRECTOR
JOSÉ RAFAEL VÁSQUEZ POLO
I.A., MSc

UNIVERSIDAD DEL MAGDALENA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA
SANTA MARTA D.T.C.H.
2014

Nota de aceptación

_____

_____

_____

_____

Presidente

_____

Jurado

_____

Jurado

Santa Marta. Julio de 2014

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo de tesis primeramente me gustaría agradecerte a ti Dios por bendecirme para llegar hasta donde he llegado, porque hiciste realidad este sueño anhelado, en segundo lugar a mi madre Marta Elena Linero, a mi padre Pedro Fernando León y a mis hermanos Tomas, Victoria y Fredy, los cuales me apoyaron para conseguir este triunfo.

A la *UNIVERSIDAD DEL MAGDALENA* por darme la oportunidad de estudiar y ser un profesional.

A mi director de tesis, el I.A.MS José Rafael Vásquez Polo por su esfuerzo y dedicación, quien con sus conocimientos y experiencia ha logrado que pueda terminar mis estudios con éxito.

Son muchas las personas que han formado parte de mi vida profesional a las que me encantaría agradecerles su amistad, consejos, apoyo, ánimo y compañía en los momentos más difíciles de mi vida. Algunas están aquí conmigo y otras en mis recuerdos y en mi corazón, sin importar en donde estén quiero darles las gracias por formar parte de mí, por todo lo que me han brindado y por todas sus bendiciones.

Para ellos: Muchas gracias y que Dios los bendiga.

María Fernanda León Linero

AGRADECIMIENTOS

A mis queridos padres Alexandra Diaz y Eduardo Palomino por la confianza brindada en este proceso, a mis hermanos Jhoan y Andrea por su apoyo y acompañamiento en estos años de estudio y esfuerzo.

A mis abuelos Lucia, Elsy, Sixto, Narcisa y Alejandro que con cada una de sus palabras me desearon éxitos y prosperidad. A cada uno de mis familiares que son un pilar en mi formación personal y profesional.

A la *UNIVERSIDAD DEL MAGDALENA* por darme la oportunidad de estudiar y ser un profesional.

Al director de tesis, el I.A.MS José Rafael Vásquez Polo por su confianza y dedicación, quien con sus conocimientos y experiencia me permitió obtener este triunfo.

A cada una de las personas que han formado parte de mi vida profesional a quienes les agradezco por su amistad, apoyo, entusiasmo y comprensión en esta etapa de mi vida.

A todos y cada uno, muchas gracias.

Mercedes Elena Palomino Diaz

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN 10
1. PRESENTACIÓN 11
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 12
3. ESTADO DE DESARROLLO 14
4. MARCO TEÓRICO 17
4.1. CARBONO Y MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO 17
4.2. CICLO DEL CARBONO 18
4.3. POSIBILIDADES DE SECUESTRO DE CARBONO EN LOS SUELOS 19
4.4. RESPIRACIÓN DEL SUELO 20
4.5. FORMAS DE CARBONO 21
4.6. DESCOMPOSICIÓN DE HOJARASCA 25
5. JUSTIFICACIÓN 27
6. OBJETIVOS 29
6.1. GENERAL 29
6.2. ESPECÍFICOS 29
7. METODOLOGÍA 30
7.1. DURACIÓN DEL PROYECTO 30
7.2. ESPACIO GEOGRÁFICO 30
7.3. DISEÑO METODOLÓGICO 33
7.3.1. Toma de muestras 33
7.3.2. Análisis físicos 33
7.3.3. Análisis químicos 33
7.3.4. Análisis del carbono 33
7.3.5. Descomposición de hojarasca 34
7.3.6. Análisis de la información y métodos estadísticos 36
8. LIMITACIONES 37
9. DESARROLLO DEL TRABAJO 38
10. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 39
10.1. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LOS SUELOS ESTUDIADOS 39

10.2. FORMAS Y CONTENIDOS DE CARBONO EN SUELOS ESTUDIADOS 41
10.3. DESCOMPOSICIÓN DE HOJARASCA..... 45
10.3.1. Porcentaje de descomposición de hojarasca..... 45
10.3.2. Respiración del suelo y su relación con la tasa de descomposición de hojarasca.... 49
11. CONCLUSIONES..... 52
12. RECOMENDACIONES..... 53
13. BIBLIOGRAFÍA..... 54
ANEXOS 64
Anexo A. Fotografías de la ejecución de la metodología..... 65
Anexo B. Propiedades físicas y químicas de los suelos estudiados 71
Anexo C. Porcentajes de pérdidas de carbono total..... 72
Anexo D. Porcentajes de descomposion de hojarasca 72
Anexo E. MANOVA tasa de descomposición de hojarasca 73

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Condiciones de uso y clasificación del clima en las zonas de estudio 32
Tabla 2. Propiedades de los suelos por zona de estudio 39
Tabla 3. Porcentaje de formas de carbono por cada zona de estudio 42
Tabla 4. Relación entre contenidos de las diferentes formas de carbono en los suelos de estudio 43
Tabla 5. Acumulación de carbono en los primeros 20 cm de profundidad Ton/ha 44
Tabla 6. Porcentajes de descomposición de hojarasca para zonas y usos del suelo 49
Tabla 7. Análisis de correlación entre tasa de descomposición de hojarasca y respiración del suelo 50

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. El ciclo terrestre del carbono: Comportamientos y flujos globales de carbono (Gt de carbono). Fuente: IPCC, 2011 19
Figura 2. Capacidad y formas de carbono en los compartimentos biogeoquímicos. (Tamaño relativo). Fuente: Macias 2004 21
Figura 3. Ubicación de los sitios de muestreo 31
Figura 4. Porcentaje de carbono total en las diferentes zonas de estudio 41
Figura 5. Porcentaje de descomposición de hojarasca por zona de estudio 46
Figura 6. Porcentaje de descomposición de hojarasca acumulado (9 mes) por uso del suelo 47
Figura 7. Relación entre respiración del suelo y porcentaje de descomposición acumulado de hojarasca 51

RESUMEN

La preocupación que tienen los países acerca del calentamiento global, ha requerido la minimización de las emisiones de gases de efecto invernadero, para esto se ha propuesto el suelo como sumidero potencial de carbono, siendo este recurso una herramienta para los países de disminuir su aporte a la atmósfera. Por lo tanto este trabajo se propuso caracterizar algunas formas y contenidos de carbono orgánico en cuatro zonas edafoclimáticas del departamento del Magdalena (zona 1: precipitación 2000 mm, 956 msnm, 24°C; zona 2: precipitación 1200 mm, 42 msnm, 28,4°C; zona 3: precipitación 750 mm, 15 msnm, 27°C; zona 4: precipitación 663 mm, 7msnm, 28°C). Para esto se determinaron las propiedades físicas y químicas, las formas y contenidos de carbonos y la tasa de descomposición de hojarasca en las diferentes zonas de estudio. Los mayores contenidos de carbono total fueron encontrados en los suelos de bosque, siendo la zona 1 la que presenta mayores contenidos de carbono en contraste con la zona 4 que fue la que presento menores contenidos, el carbono ligado a la fracción húmica fue aproximadamente un 44 % del carbono total en las diferentes a excepción de la zona 3 que fue aproximadamente un 77 %. El mayor porcentaje de descomposición de hojarasca se presentó en la zona 1 (90 %) en contraste con la zona 4 donde se presentó solo el 16 %, a excepción de la zona 3 (cultivo banano y bsT) se encontraron diferencias estadísticas entre los porcentajes descomposición de hojarasca para usos del suelo. La tasa de descomposición de hojarasca presentó una correlación positiva con la respiración del suelo expresada en (µg C-CO2/h*g.suelo), Para las condiciones de las zonas de estudio se puede concluir que el manejo y el uso de los suelos es un factor importante que influye en los contenidos y formas de carbono y así mismo las condiciones edafoclimáticas y la actividad microbiana ya que condicionan los procesos de descomposición de hojarasca y por ende la residencia del carbono orgánico en el suelo.

Palabras claves: Carbono, Gases efecto invernadero, condiciones edafoclimáticas.

1. PRESENTACIÓN

En el marco del desarrollo del grupo de investigación Suelo, Ambiente y Sociedad (GISAS), se formuló y ejecutó el proyecto “FORMAS DE CARBONO ORGÁNICO EN SUELOS DE USOS DIFERENTES AL NORTE DEL DEPARTAMENTO DEL MAGDALENA”, con el objetivo de caracterizar algunas formas y contenidos de carbono orgánico en suelos de cultivos representativos del departamento. El estudio muestra la importancia del suelo como recurso natural que almacena y captura el carbono (C), minimizando los efectos del elemento en el ambiente. El suelo es el reservorio de C con el stock más activo del total del C terrestre, contribuyendo a compensar las emisiones de gases efecto invernadero (GEI) que hoy día realiza la actividad industrial en pro del desarrollo tecnológico y social.

La actividad agrícola representa una fuente importante de emisión de dióxido de carbono (CO_2), aumentando la concentración del gas de efecto invernadero en la atmósfera, los suelos pueden ser sumideros de C dependiendo el uso y el tratamiento que reciban. Colombia es un país de actividad agrícola por lo que esta perspectiva es potencial para minimizar los aportes de emisiones de gases contaminantes, y dar cumplimiento a los objetivos del protocolo de Kyoto.

La vocación de los suelos del departamento del Magdalena está relacionada principalmente con la actividad agropecuaria, por esto algunos de los cultivos representativos de la zona se tomaron para ejecutar el proyecto y caracterizar la importancia de esta actividad en el suelo. La ejecución del proyecto permitió observar y analizar las condiciones climáticas y ambientales, que favorecen el almacenamiento y captura de C en los diferentes suelos de la región, así como también la influencia de la actividad humana en los suelos, caracterizando la capacidad de almacenamiento una vez han sido tratados y manejados.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

¿Cómo influyen los diferentes usos del suelo en la zona norte del departamento del Magdalena sobre las formas y contenidos de carbono orgánico (CO)?

El desarrollo tecnológico, social y económico de las naciones genera impactos ambientales que afectan negativamente los recursos energéticos y naturales que ofrece el planeta. La emisión acelerada de gases contaminantes aumenta la concentración de los GEI, que a su vez activan el cambio climático y calentamiento global del planeta. Ante los posibles riesgos de un forzamiento climático de gran duración e intensidad, derivado de las actividades antrópicas, se están realizando diferentes aproximaciones para tratar de mantener, y si es posible disminuir, la concentración de estos (principalmente el CO_2 y el CH_4) mediante diferentes propuestas que tienen por objetivo la limitación de las emisiones de los mismos a la atmósfera. Esta medida, sin duda la más eficaz, tiene importantes consecuencias económicas por las grandes modificaciones tecnológicas y socioeconómicas que deben realizarse en muy poco tiempo, existiendo, además, fuertes diferencias entre los países según la disponibilidad de sus recursos energéticos propios, la estructura de sus sistemas productivos y su nivel económico [39].

El protocolo de Kyoto demanda una comprensión de la estabilización del C en el suelo porque este reservorio representa el compartimiento terrestre de mayor capacidad y las actuaciones sobre él pueden conducir a que actúe como un sumidero o una fuente de C a la atmósfera; en este sentido las consecuencias de las técnicas agrícolas y silvícolas realizadas conducen a unas pérdidas de C hacia la atmósfera superiores a las producidas en el mismo período por actividades industriales y el transporte, a pesar de las mejoras introducidas con las llamadas “agriculturas sostenibles”, “buenas prácticas agrícolas”. Naturalmente, esta

situación en la que los suelos actúan como una fuente de C a la atmósfera, ha llevado a un importante descenso del sumidero terrestre que puede y debe recuperarse [20].

Los diferentes usos del suelo han permitido la salida de C a la atmósfera y ha reducido la fijación de C por la biomasa, al transformar las propiedades naturales de los bosques, u otros reservorios de C; Colombia emite el 0,25 % de las emisiones globales de CO_2, el cual en su mayoría proviene por el cambio del uso del suelo [30]. En Colombia la actividad agropecuaria representa la principal fuente de emisión de gases de efecto invernadero, mejorando las prácticas y manejo en este sector se puede contribuir a la reducción de las mismas; a su vez favorecer las propiedades agrobiologicas de los suelos. En cada país, la retención de C puede servir para compensar una parte de sus emisiones, y así cumplir los compromisos del protocolo de Kyoto, mecanismo de ejecución del convenio marco de las naciones unidas sobre el cambio climático [20].

El 45 % de las emisiones de GEI de Colombia provienen de la agricultura y el 9 % de este total se produce por cambios en el uso de la tierra y forestales, pero la agricultura representa el 8 % del PIB nacional y el 20 % de los empleos del país [18]. El sector satisface gran parte de la demanda interna de la nación y tiene una importante participación en los mercados internacionales de café, banano, azúcar y aceite de palma.

3. ESTADO DE DESARROLLO

El CO del suelo es un componente importante de ciclo global del C ocupando un 69.8 % del CO de la biosfera [19], los suelos contienen más C que la suma existente en la vegetación y en la atmósfera [40].

No obstante en grandes extensiones de tierra el suelo tiene un nivel de C muy inferior al que le correspondería por razones climáticas, ya que las actuaciones humanas han disminuido fuertemente el porcentaje de C existente en los suelos [34]. Por otra parte, la velocidad de recuperación de todo o parte del C perdido es relativamente rápida, especialmente cuando se parte de niveles muy bajos de C orgánico [42].

El suelo puede actuar como fuente o reservorio de C hacia la atmósfera, dependiendo del uso que se le asigne. El manejo agrícola convencional de suelos, con uso intensivo del arado, promueve la liberación de C, mientras que el uso conservacionista favorece la acumulación de C en formas orgánicas dentro del suelo [40].

La acumulación y el secuestro de C son servicios ecosistémicos que cumplen funciones importantes para el bienestar humano, como son la regulación de gases (regular el balance CO_2/O_2, mantener la capa de ozono, regular los niveles de SO_x) y la regulación climática (regulación de GEI) [14]. Actualmente son varios los estudios destinados a determinar la capacidad de secuestro de C en los ecosistemas forestales, tanto en plantaciones de especies exóticas, como en bosques nativos. Se ha demostrado que los ecosistemas forestales, con un manejo adecuado, pueden secuestrar más C que otros ecosistemas terrestres [16], contribuyendo a la mitigación del cambio climático, producido por el aumento de la concentración del CO_2 atmosférico.

Según Lal [35], los depósitos de C en el suelo y su dinámica se encuentran estrechamente relacionados con la fauna edáfica, la cual es considerada un factor de gran influencia en las propiedades físicas y biológicas del suelo, especialmente en lo relacionado con la estructura, porosidad, aireación, infiltración, drenaje, reciclaje de nutrientes y flujo de materia orgánica (MO). Al respecto Lal [35] afirma que una de las estrategias viables para disminuir las concentraciones de CO_2 en la atmósfera, es el incremento de la densidad del CO del suelo, mejorando la distribución en profundidad y encapsulándolo dentro de los microagregados, de manera que el C esté protegido de los procesos microbiales y se vuelva recalcitrante; lo que según Feldpausch [22] se convierte en una consideración importante para el manejo futuro de créditos de C [12].

Desde la agricultura, los estudios referentes a la captura de C surgen como un campo en la investigación acerca de la función que los sistemas agrícolas pueden cumplir frente al cambio climático [71]. Sampson [54] menciona antecedentes de proyectos de captura de C en el contexto de la agricultura, asociados al programa 1605(b) relacionado con investigaciones sobre gases de efecto invernadero, que tuvo inicio en el año 1995. No obstante, el mismo autor aclara que, a pesar de las supuestas ventajas que puede ofrecer la alternativa de los sistemas agrícolas frente a la captura de C, también existen diferentes inconvenientes, no sólo acerca del grado de incertidumbre de dichas actividades dadas las condiciones en las que se desarrollan, sino de los sesgos de los métodos utilizados y las bases históricas, frente a si esta captura puede tener algún impacto, para lo cual es necesaria la investigación profunda en el tema.

West [71] pudo constatar variaciones en contenidos de C tomando en cuenta prácticas de labranza y encontrando diferencias significativas de un cultivo a otro mediante una evaluación de la captura de C por parte de diferentes tipos de cultivos: el maíz y el trigo.

En Colombia este tipo de estudio solo se ha desarrollado en los andes donde se evaluaron los contenidos de acuerdo a la variación en el paisaje dando como resultado que La profundidad del suelo influye sobre los contenidos de materia orgánica (MO), encontrando más C y N almacenado en la capa superficial con tendencia a disminuir hacia las capas inferiores [12].

4. MARCO TEÓRICO

4.1. CARBONO Y MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO

El carbono orgánico del suelo (COS) se asocia con la sustentabilidad de los sistemas agrícolas afectando las propiedades del suelo relacionadas con el rendimiento sostenido de los cultivos [40]. En condiciones naturales, el COS resulta del balance entre la incorporación al suelo del material orgánico fresco y la salida de C del suelo en forma de CO_2 a la atmósfera [1, 63], erosión y lixiviación. Las existencias de CO presente en los suelos naturales representan un balance dinámico entre la absorción de material vegetal muerto y la pérdida por descomposición (mineralización). En condiciones aeróbicas del suelo, gran parte del C que ingresa al mismo es lábil y solo una pequeña fracción (1 %) del que ingresa (55 Pg/año) se acumula en la fracción húmica estable (0,4 Pg/año) [21].

Se conoce como materia orgánica del suelo (MOS) a un conjunto de residuos orgánicos de origen animal y/o vegetal, que están en diferentes etapas de descomposición, y se acumulan tanto en la superficie como dentro del perfil del suelo [8, 52]. Además, incluye una fracción viva, o biota, que participa en la descomposición y transformación de los residuos orgánicos [1]. El COS es el principal elemento que forma parte de la MOS, por esto es común que ambos términos se confundan o se hable indistintamente de uno u otro [40].

Se estima que desde que se incorporan nuevos suelos a la agricultura hasta establecer sistemas intensivos de cultivo se producen pérdidas de COS que fluctúan entre 30 y 50 % del nivel inicial [50]. Existen prácticas agronómicas que favorecen la captura de C en el suelo [73]; las prácticas de manejo que alteran el rendimiento de los cultivos y la productividad de los suelos pueden afectar la

superficie del suelo con los consiguientes efectos en el secuestro de C y las emisiones de gases de efecto invernadero [72].

En la MOS se distingue una fracción lábil, disponible como fuente energética, que mantiene las características químicas de su material de origen (hidratos de C, ligninas, proteínas, taninos, ácidos grasos), y una fracción húmica, más estable, constituida por ácidos fúlvicos, ácidos húmicos y huminas [1, 24]. Cada una de estas fracciones se obtiene por solubilización en medios ácidos o alcalinos. Sin embargo, este tipo de fraccionamiento se encuentra limitado por la presencia de componentes no húmicos extraídos junto con la fracción húmica que no pueden ser separados efectivamente mediante esta metodología [26, 27]. Las sustancias húmicas son el principal componente de la MOS y representan, por lo menos el 50 % de ésta [58].

La MOS es un indicador clave de la calidad del suelo, tanto en sus funciones agrícolas (p. ej. producción y economía) como en sus funciones ambientales entre ellas captura de C y calidad del aire. La cantidad, la diversidad y la actividad de la fauna del suelo y de los microorganismos están directamente relacionadas con está [20].

4.2. CICLO DEL CARBONO

El C, es un componente básico y fundamental para la vida, está presente en la atmósfera, en la vida vegetal y animal, en la MO no viva, en los combustibles fósiles, en las rocas y también esta disuelto en los océanos [11, 41], aproximadamente el 50 % del peso seco de MO es C.

El ciclo terrestre del C se presenta en la figura 1. En este, el COS representa la mayor reserva en interacción con la atmósfera y se estima en cerca de 1500 Pg C

a 1 m de profundidad (cerca de 2456 a dos metros de profundidad). El C inorgánico representa cerca de 1700 Pg pero es capturado en formas más estables tales como el carbonato de calcio. La vegetación (650 Pg) y la atmósfera (750 Pg) almacenan considerablemente menos cantidades que los suelos. Los flujos entre el COS y la atmósfera son importantes y pueden ser positivos bajo la forma de captura o negativos como emisión de CO_2 [20].

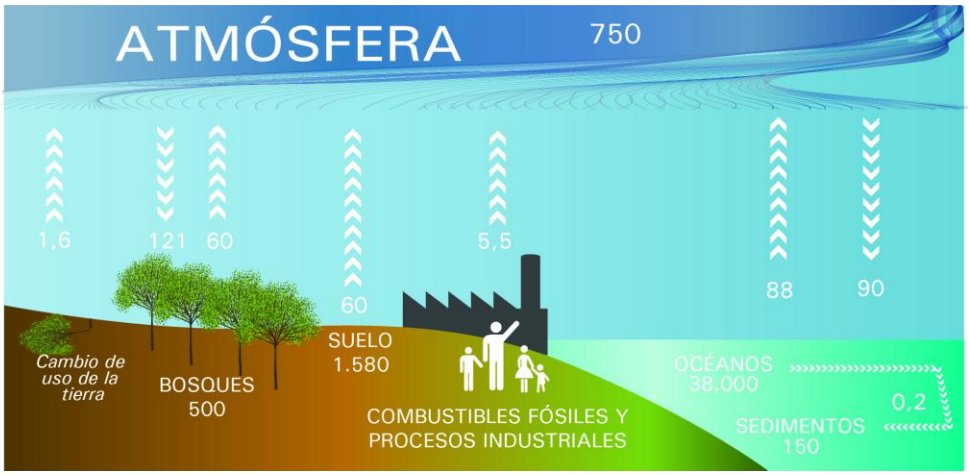


Figura 1. El ciclo terrestre del carbono: Comportamientos y flujos globales de carbono (Gt de carbono). Fuente: IPCC, 2011

El C almacenado en la biosfera se encuentra distribuido entre los océanos, las reservas geológicas y los ecosistemas terrestres y este circula de manera constante. Estos compartimentos presentan intercambios dinámicos de C con la atmósfera, intercambios en los que la actividad humana tiene gran influencia [20].

4.3. POSIBILIDADES DE SECUESTRO DE CARBONO EN LOS SUELOS

En el sumidero edáfico existen diferentes formas de C, las orgánicas, procedentes en último caso del C previamente almacenado en la biota y las inorgánicas, una parte de las cuales se ha originado por la carbonatación del calcio liberado en los procesos de alteración mineral por el CO_2 atmosférico o el liberado por la

respiración de los diferentes organismos del suelo, esto permite poder secuestrar C, tanto directamente en el suelo como indirectamente a través del compartimento biótico, pero es este último mecanismo el mejor conocido puesto que el proceso de “acumulación” de C en el suelo procedente de los restos vegetales y animales (la humificación) ha sido ampliamente estudiado. Además, en el caso de zonas húmedas no se produce acumulación de C inorgánico en los suelos, por lo que este mecanismo no puede ser tenido en cuenta aunque sí debe considerarse cuando se trata de regiones xéricas o arídicas [40].

4.4. RESPIRACIÓN DEL SUELO

El CO_2 de los suelos es producido principalmente por la respiración de las raíces vivas y los organismos heterótrofos; la gran mayoría de éste CO es emitido a la atmósfera en el proceso conocido como respiración del suelo, flujo de CO_2 o evolución del CO_2 en el suelo [49].

La respiración del suelo se define como la producción de CO_2 por unidad de área y de tiempo, debido a dos procesos: la ruptura, u oxidación de la materia orgánica rica en C por medio de los microorganismos del suelo, y la respiración de las células de las raíces de las plantas. La tasa de producción de CO_2 es científicamente importante porque nos da una indicación de la tasa de descomposición de la MO y por tanto de la cantidad que se pierde de C del suelo. Las medidas de la respiración del suelo ayudan a determinar la contribución del suelo al balance del CO_2 en la atmósfera [53].

Las tasas de respiración del suelo han sido medidas en gran variedad en diferentes tipos de ecosistemas con el fin de evaluar la actividad microbiana, el reciclaje de nutrientes, los flujos de C y energía, la dinámica de las raíces, y otros procesos que tienen lugar allí. Se ha reportado que la respiración del suelo podría

representar del 40 al 90 % de la respiración de los ecosistemas forestales [46]. En una escala global, la respiración del suelo produce 80,4 Pg C-O_2 anualmente (1 Petagramo Pg = 1015 g), el cual es aproximadamente 10 veces más alto que la combinación de la deforestación y la combustión de compuestos fósiles. Así, pequeños cambios en la respiración del suelo pueden influir enormemente en la concentración del C atmosférico y en el balance calórico [69].

4.5. FORMAS DE CARBONO

Las formas de C existentes en los suelos responden a una de las indicadas en la figura 2: formas orgánicas (humus), formas inorgánicas sólidas (carbonatos), formas inorgánicas solubles (CO_2 disuelto e iones derivados según el pH, CID) y formas orgánicas solubles (COD) a las que deberían añadirse las formas gaseosas (CO_2, CO y CH_4) presentes en la atmósfera del suelo [38].

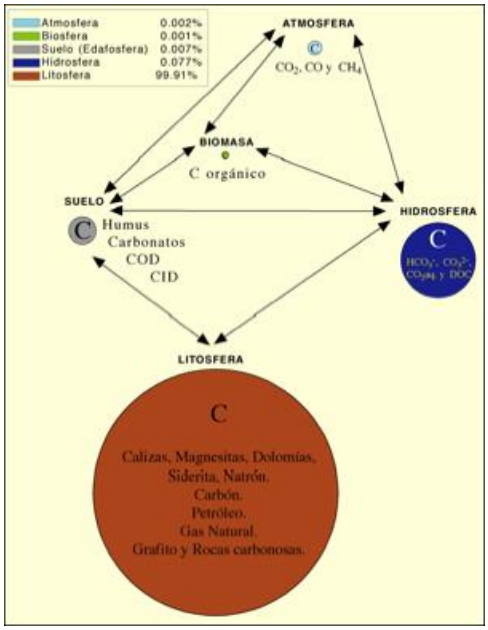


Figura 2. Capacidad y formas de carbono en los compartimentos biogeoquímicos. (Tamaño relativo). Fuente: Macias 2004

La SSSA [60] iguala la MOS al humus y la define como “la fracción orgánica del suelo con exclusión de los restos de plantas y animales”. Fisher [23] señala que hay miles de formas de C en la MOS, pudiendo identificarse tres grandes tipos de componentes:

- Sustancias simples, tales como los aminoácidos, azúcares y otras moléculas pequeñas.
- Compuestos identificables de alto peso molecular, tales como polisacáridos, proteínas y lípidos.
- Sustancias húmicas, de alto peso molecular y estructura compleja formada por reacciones secundarias de síntesis. Stevenson [61] también iguala el humus a la MOS, a la que considera como una mezcla compleja de compuestos derivados de plantas y microorganismos, pero sin incluir a las sustancias simples ni tampoco a la MO viva.

Los métodos de identificación del COS más ampliamente utilizados, se basan en su oxidabilidad y/o en la consiguiente pérdida de peso. Tabatabai [64] mostró que la MO se podía oxidar con dicromato en medio sulfúrico y esa es la base del método más extendido de determinación del C en suelos. Este método de oxidación no está libre de problemas e inconsistencias, en primer lugar, no determina MO; en segundo lugar, cuando hay mucho Fe es necesario añadir más fosfórico como complejante del que muchas veces indican los métodos y en tercer lugar, y lo más importante, se ha comprobado que en muchos suelos hay formas de C no oxidables, incluso con la técnica del dicromato en medio ácido y caliente. La aparición del “black carbon” y de las formas recalcitrantes de C pone en entredicho que los datos del método de oxidación con dicromato sean los adecuados para calcular el sumidero total de C de los suelos [38].

Si la oxidación de la MO es una técnica que aprovecha su inestabilidad termodinámica pueden hacerse otras determinaciones de formas de C basadas en

otras propiedades. Así, puede determinarse el *C soluble* en agua a diferentes temperaturas [25, 27]; el *C presente en la biomasa microbiana* [65]; el *C metabolizable* a diferentes condiciones de humedad (respirometrías), que puede obtenerse con los nutrientes actualmente existentes (C metabolizable actualmente asimilables (C no metabolizable); el *C hidrolizable* en diferentes condiciones de pH [47]; *C mineralizado* en tiempos de incubación determinados, con o sin adición de nutrientes [38].

Otras líneas de determinación de formas de C pueden darnos indicación no sólo de la labilidad del C frente a la oxidación y al metabolismo o la hidrólisis, sino de la mayor o menor facilidad de acceso físico de los oxidantes y microorganismos a los compuestos orgánicos, lo que algunos autores han definido como "protección física". Entre estas alternativas pueden señalarse las determinaciones de *C lábil* o *C activo* [17], que consideran puede ser igualada a la producción de CO_2 en incubaciones de laboratorio controladas; C recalcitrante, al que muchos autores han considerado equivalente a materiales identificados como "charcoal", "black carbon", etc., que podrían ser determinados por irradiación ultravioleta o extracción preferencial [33], si bien es muy difícil diferenciar la cantidad de C que es bioquímicamente recalcitrante de la que es difícil de descomponer porque está protegida físicamente y en asociación con el limo y la arcilla; *C fracción ligera* (separada con líquidos de densidades 1.5 a 2.0); *C particulado*, incorporado a agregados de diferentes tamaños y considerando que la localizada dentro de los microagregados de 53-250 micras no está protegida del ataque metabólico [59]. En esta línea, estos autores consideran que la MOS puede estar:

- Físicamente estabilizada o protegida a través de la microagregación,
- Asociada íntimamente con partículas de limo o arcilla,
- Estabilizada bioquímicamente a través de la formación de compuestos de MOS recalcitrantes, sugiriendo que las características fisicoquímicas propias de cada tipo de suelo (más bien estructura o agregación) definen la máxima capacidad

protectora, lo que limitaría el incremento en secuestro de C cuando se aportan residuos orgánicos por necromasa o por acciones antrópicas.

A partir de este concepto, Six [59] elaboran el de "*saturación de C*", considerando que los niveles naturales de C de los suelos reflejan el balance de las ganancias y pérdidas de C teniendo en cuenta factores como la productividad y/o los regímenes de humedad y temperatura, pero no necesariamente representando el límite superior de la capacidad de almacenamiento de C del suelo. Esto significa que muchos suelos, si no todos, podrían almacenar más C en forma metaestable del que tienen en condiciones naturales. Esto se ha comprobado en algunas situaciones. Así diferentes datos empíricos han demostrado que si bien el laboreo suele reducir los niveles de C algunos sistemas agrícolas de cultivo intensivo y algunos ecosistemas pastorales pueden superar los niveles de C existentes con vegetación nativa. En consecuencia, los niveles naturales de C pueden no ser representativos de la capacidad de sumidero de los suelos en condiciones de equilibrio, sino que ésta puede estar limitada fundamentalmente por los procesos de aporte de necromasa [38].

Sin embargo, también hay muchas evidencias de la existencia de un nivel de saturación de C de los suelos basado en los procesos fisicoquímicos que estabilizan o protegen los compuestos orgánicos de los suelos. Algunos autores han comprobado que aportando 2 ó 3 veces más C no sube el contenido de suelos con altos niveles de C [38]. Varias propiedades físicas (p.e.: contenido de limo+arcilla y microagregación) están implicadas en la protección de la MO frente a los organismos descomponedores, pero esta protección parece estar limitada por la superficie específica reactiva. Sin embargo, en los suelos hay muchas formas de C, con grados muy diferentes de estabilidad, de modo que algunas fracciones son especialmente recalcitrantes y escapan durante largos períodos a la actuación de los procesos bióticos y a la tendencia de oxidación impuestas por la termodinámica o por la actividad metabólica [38].

El C extraíble con pirofosfato representa lo que podría denominarse el “C humificado” o “C activo”, formado por diferentes compuestos de C unidos a elementos metálicos e incluso a componentes minerales del suelo. El C oxidable, pero no extraíble con pirofosfato, debe atribuirse a las fracciones que ya han escapado a la actividad biológica, e incluso a los procesos oxidativos normalmente existentes en los suelos, cuya intensidad en los suelos (Eh: 300-500 mvol, en suelos bien drenados) es muy inferior a la existente en las condiciones del método utilizado para obtener esta fracción (Eh > 1000 mvol.). Finalmente, la diferencia entre el total de C obtenido por combustión y el C oxidable representa en suelos libres de carbonatos, las formas de C tan recalcitrantes que ni siquiera son oxidadas en condiciones extremadamente forzadas [38].

4.6. DESCOMPOSICIÓN DE HOJARASCA

La descomposición de hojarasca está regulada por varios factores, entre ellos, la humedad, temperatura, calidad de la hojarasca y la actividad de los microrganismos. La hojarasca produce un abrigo orgánico sobre la superficie de los suelos, dando por resultado condiciones adecuadas para los organismos. Como proceso, la descomposición es clave para el funcionamiento de los bosques, ya que si los nutrientes son liberados rápidamente, pueden perderse por lixiviación edáfica o por volatilización [57]. Por el contrario, si la descomposición es muy lenta, el capital de nutrientes disponible para las plantas puede ser insuficiente, y limitar el crecimiento y desarrollo [13].

El patrón general para la pérdida de peso de la hojarasca en descomposición comprende dos fases de estado, una inicial de rápido desarrollo por el lavado de compuestos solubles y la descomposición de materiales lábiles (e.g. azúcares, algunos fenoles, almidones y proteínas), y una segunda más lenta, como resultado

de la lenta descomposición de elementos recalcitrantes como celulosa, hemicelulosa, taninos y lignina [5].

La descomposición y liberación de nutrientes de la hojarasca, constituyen procesos clave para garantizar el adecuado funcionamiento de los ciclos biogeoquímicos, y con ellos favorecer unas apropiadas condiciones físicas, químicas y biológicas de los suelos [13].

La humedad y la temperatura son factores que influyen en los procesos de descomposición del material vegetal, en la época de lluvia hay pérdida de peso por el lavado de los nutrientes y crecimiento de población microbiana. Estudios realizados en bosque alto andino y bosque bajo húmedo tropical en Colombia corrobora el efecto de la humedad en la concentración y actividad microbiana en el suelos, al igual que la calidad del sustrato que puede determinar la densidad de microorganismos que participan en la descomposición de hojarasca. Además del efecto de la fauna edáfica del suelo que cumple una función importante en los procesos de descomposición de hojarasca [9]

5. JUSTIFICACIÓN

La preocupación que tienen los países acerca del calentamiento global, ha requerido la minimización de las emisiones de gases de efecto invernadero, en la medida y en la extensión requeridas por el protocolo de Kyoto en la conferencia de las partes en Durban [15]. Los estudios ambientales en torno a la preocupación mundial, proponen el suelo como sumidero potencial de C, siendo este recurso la herramienta para los países dedicados a la agricultura de disminuir su aporte a la atmósfera de CO_2. El secuestro de CO en el suelo puede llegar a garantizar una disminución en las emisiones de CO_2, así como de fortalecer la estructura del suelo con la estabilización de algunas de sus formas. Los procesos de estabilización podrán permitir la formación de fracciones húmicas del material orgánico, que disminuirá el porcentaje de oxidación por parte de la biomasa, y enriqueciendo el suelo en sus procesos naturales, y desarrollo agrícola.

Los niveles de secuestro de CO se rigen por el equilibrio entre el C de entrada y salida, y es fuertemente influenciado por las prácticas de manejo del suelo [48]. En diferentes lugares se observa la variación del C por las prácticas humanas en el suelo, en California se estudia la captura de C y la dinámica en las principales regiones agrícolas y como el riego en las regiones semiáridas del suelo pueden alterar los procesos de secuestro de C. En Colombia este tipo de estudio solo ha sido incursionado en los Andes donde poco se han evaluado almacenamientos de C de acuerdo con las variaciones en el paisaje, ya que este elemento depende de las condiciones específicas de cada sitio, requiriendo métodos de muestreo que permitan representar cambios a nivel local y del paisaje para la identificación de patrones de distribución [36]. Por otra parte Batjes [3] plantea que los agroecosistemas pueden ser manejados para reducir emisiones e incrementar depósitos de C, pero las opciones se deben escoger con base en el conocimiento de la magnitud de los almacenamientos edáficos de un bioma o región agroecológica, y la respuesta de los suelos a diferentes usos.

Globalmente los suelos a un metro de profundidad contienen 1500 Gt de C, de los que se estima que el 44 % está en los trópicos, donde los tiempos de residencia de la MO son menores y por lo tanto los depósitos de C son más susceptibles a la sustitución de usos [37]. Las características del paisaje son fundamentales en la fijación de CO en el suelo, un bosque en su estado natural y un suelo intervenido presentan mayor variabilidad en su porcentaje de CO y así mismo en la forma en cómo estos lo almacenan.

Colombia es un país de actividad agrícola, gran parte del territorio nacional es usado para cultivar alimentos de autosostenimiento, frutas de exportación y vegetación utilizada en proyectos de biocombustible. El departamento del Magdalena no es ajeno a esta actividad, los cultivos de palma, café y banano son los más representativos de la región, las características climáticas favorecen el desarrollo variado de la agricultura, contando con un paisaje tropical acompañado de grandes montañas y planicies que comprenden climas secos y húmedos, aportando variación en la temperatura de 18 °C a 38 °C gracias a la sierra nevada de Santa Marta y los 5775 mt de altura sobre el nivel del mar que esta posee.

Por lo anterior, en este trabajo se propone caracterizar las formas y contenidos de CO en suelos de usos diferentes representativos en la región norte del departamento del Magdalena, puesto que en esta zona no se registran estudios relacionados con la caracterización cualitativa del C.

6. OBJETIVOS

6.1. GENERAL

Caracterizar algunas formas y contenidos de CO en suelos de cultivos representativos del departamento del Magdalena y suelos de bosques aledaños a estas zonas.

6.2. ESPECÍFICOS

- Determinar las propiedades físicas (textura, color, densidad aparente) y químicas (nitrógeno total (N), fosforo (P), pH y la relación C/N), de los suelos muestreados.
- Determinar los contenidos de C total (Ct), C oxidable (Cox), C no oxidable (Cnox), C ligado a la fracción húmica (Cp).
- Establecer la tasa de descomposición de hojarasca en las diferentes zonas de muestreo y su relación con la respiración del suelo.

7. METODOLOGÍA

7.1. DURACIÓN DEL PROYECTO

La investigación se realizó en un periodo de veintisiete meses (27 meses), en los cuales se llevaron a cabo diferentes actividades que consistieron en la estructuración del proyecto, toma de muestras, análisis fisicoquímicos en el laboratorio de los suelos muestreados, ensayo de descomposición en campo y laboratorio, organización de datos, análisis estadístico, interpretación de resultados y redacción del documento final.

7.2. ESPACIO GEOGRÁFICO

La investigación se realizó al norte del departamento del Magdalena, en los municipios de Santa Marta (11°11′15 N 74°07′12 W), Zona Bananera (10°57′51 N 74°12′26 W) y Aracataca (10°32′28 N 74°10′06 W), incluyendo el flanco noroccidental de la sierra nevada de Santa Marta (10°53´58 N, 74°05´45 W), con una superficie de 23.188 km^2 [68].

Para el estudio se seleccionaron cuatro zonas (figura 3) la primera zona se ubica en la sierra nevada de Santa Marta, la segunda zona en el municipio de Aracataca, la tercera zona en la Zona Bananera y la cuarta Zona en la granja experimental de la universidad del Magdalena, estas se clasificaron por condiciones de clima, relieve y tipo de suelo (tabla 1).

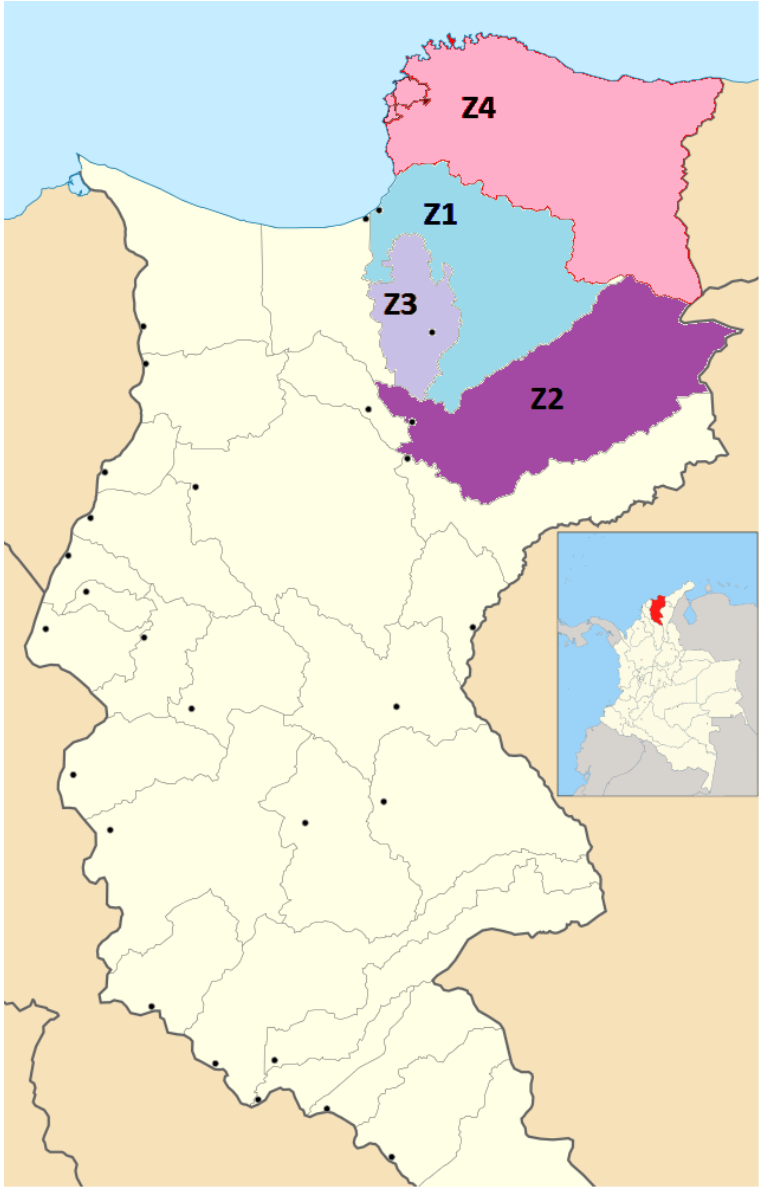


Figura 3. Ubicación de los sitios de muestreo

Tabla 1. Condiciones de uso y clasificación del clima en las zonas de estudio

Zona de muestreo	Uso del suelo	Clima y altitud	Clasificación	Paisaje
1	Cultivo café	Cálido húmedo Altitud 956 m.s.n.m.; Precip. 2000 mm; Tem 24°C	Typic Eutrudepts	Paisaje de montaña; Ladera
	Bosque húmedo tropical	Cálido húmedo Altitud 956 m.s.n.m.; Precip. 2000 mm; Tem 24°C	Typic Eutrudepts	Paisaje de montaña; Ladera
2	Cultivo palma africana	Cálido seco Altitud 42 m.s.n.m.; Precip. 1200 mm; Tem 28.4°C	Typic Ustifluvents	Paisaje de planicie
	Bosque seco tropical	Cálido seco Altitud 42 m.s.n.m.; Precip. 1200 mm; Tem 28.4°C	Typic Ustifluvents	Paisaje de planicie
3	Cultivo Banano	Cálido seco Altitud 15 m.s.n.m.; Precip. 970 mm; Tem 27°C	Typic Haplusteps	Paisaje de planicie
	Bosque seco tropical	Cálido seco Altitud 15 m.s.n.m.; Precip. 750 mm; Tem 27°C	Typic Haplusteps	Paisaje de planicie
4	Cultivo hortalizas	Cálido seco Altitud 15 m.s.n.m.; Precip. 750 mm; Tem 27°C	Typic Ustipsamments	Paisaje de planicie
	Bosque muy seco tropical	Cálido seco Altitud 7 m.s.n.m.; Precip. 663 mm; Tem 28°C	Typic Ustipsamments	Paisaje de planicie

7.3. DISEÑO METODOLÓGICO

7.3.1. Toma de muestras

Se realizó un muestreo aleatorio y estratificado, seleccionando zonas o estratos definidos por el uso del suelo (cultivo y bosque) (anexo A), estos se seleccionaron en el clima cálido entre 0 y 1000 msnm como lo muestra la tabla 1; dentro de cada sitio de muestreo se tomaron cuatro muestras (compuestas) de suelo a veinte centímetros de profundidad, cada una compuesta de 10 submuestras tomadas aleatoriamente; las muestras se guardaron en bolsas para su posterior análisis [7].

7.3.2. Análisis físicos

Se determinó el color en seco y húmedo mediante la tabla Munsell, la densidad aparente (Da) se determinó mediante el método del cilindro graduado y la textura se realizó por el método del Hidrómetro de Bouyoucos [31]

7.3.3. Análisis químicos

El pH se realizó en H_2O, en una relación 1:2.5 [31], el N total se determinó mediante un analizador LECO (Modelo CHN-1000, LECO Corp., St Joseph, MI) y el P por el método Olsen.

7.3.4. Análisis del carbono

El Ct se determinó mediante un analizador LECO (Modelo CHN-1000, LECO Corp., St Joseph, MI), el Cox mediante la técnica Walkley Black [70], para el C extraíble con pirofosfato sódico 0.1 N se utilizó la metodología descrita por Bascomb [2] y el Cnox se estimó por medio de la diferencia de Ct menos el Cox

(anexo A). Para las determinaciones respirométricas se empleó un respirómetro automatizado Micro-Oxymax de la casa comercial Columbus Instruments. Para los contenidos de Ct se tuvo en cuenta lo siguiente:

kg Ct m^{-2} = Ct en g kg^{-1} * Da en g cm^{-3} *profundidad de muestreo en m.

La determinación del N y el Ct se realizaron dentro del marco de desarrollo del proyecto de FONCIENCIAS “FORMAS DE C ORGANICO EN SUELOS DE USOS DIFERENTES EN EL NORTE DEL DEPARTAMENTO DEL MAGDALENA (Colombia)”.

7.3.5. Descomposición de hojarasca

7.3.5.1. Preparación de las bolsas

Las bolsas se elaboraron con malla de nylon 1 mm de poro, para evitar pérdidas de material por la fragmentación, y la exclusión de algunos descomponedores importantes [62, 74]. El Tamaño de las bolsas fue de 20x20cm, cada una de las cuales se llenó con hojas de frijol cabecita negra (*Phaseolus vulgaris*).

7.3.5.2. Preparación del material *Phaseolus vulgaris*

Este se sembró en una terreno de 200 m^2, por 2 meses, se recogió y selecciono el material vegetal que presento óptimas condiciones (hojas verdes y sin fruto) (anexo A), se llevaron al laboratorio para lavarlas y secar en el horno por 72 horas a 70 °C, al retirar el material del horno se llevó a un cuarto de secado para estabilizar el peso. Se pesaron las bolsas vacías para obtener el peso de cada

una, luego se introdujo la hojarasca hasta que cada bolsa quedara topada y se tomó el peso inicial P_i.

7.3.5.3. Bolsas en sitio de estudio

En cada uno de los sitios se colocaron 36 bolsas, las cuales se fijaron en grupos de 18 bolsas por uso, para un total de 144 bolsas en las 4 zonas (anexo A). La recolección se dio en periodos mensuales hasta el 4 mes (3 bolsas por uso, 6 por zona, en cada recolección), se estipulo las siguientes recolecciones al 6 mes y 9 mes.

7.3.5.4. Métodos de laboratorio

Las bolsas retiradas de campo fueron llevadas al laboratorio, en donde las bolsas fueron limpiadas manualmente con un pincel para eliminar raíces, pequeños invertebrados, y partículas de suelo (anexo A). Posteriormente fue llevado al horno a 70 °C y luego al cuarto de secado para estabilizar el peso y así obtener peso final P_f, los datos de descomposición se obtuvieron con la siguiente formula [9]:

$$D = 1 - \left(\frac{P_f}{P_i}\right) * 100$$

Donde:
D=tasa de descomposición
Pf=peso final
Pi= peso inicial

7.3.6. Análisis de la información y métodos estadísticos

Se analizaron los datos mediante un ANOVA factorial multivariado MANOVA (dos factores tratamientos: zonas y usos del suelo), con el fin de establecer estadísticamente el posible efecto individual de las zonas, usos o de su interacción zonas*usos, tasa de descomposición de hojarasca y las formas de C determinadas.

A su vez se realizó un análisis de correlación lineal para establecer las relaciones entre la respiración del suelo, tasa de descomposición de hojarasca, con el objeto de inferir acerca de la relación o influencia de los usos del suelo y la liberación de CO_2 a la atmósfera.

De igual manera se tuvo en cuenta la estadística descriptiva para el análisis y relación de algunas propiedades con la evaluación de la captura y contenidos de C.

8. LIMITACIONES

Colombia es un país que ha pasado por una serie de conflictos armados que desfavorecen la movilidad de algunas poblaciones, el departamento del Magdalena no ha sido ajeno a esta situación, parte de la región se ha visto involucrada en el conflicto, por lo que en ocasiones es difícil acceder a algunas zonas. El año 2012 y 2013 se presentaron a nivel nacional y regional protestas en el sector agrícola, esta situación dificultó el ingreso a los sitios de estudio, por ende la toma de muestra, las visitas y seguimientos se vieron interrumpidos, aplazando el análisis de laboratorio, los resultados y análisis estadístico de los mismos.

9. DESARROLLO DEL TRABAJO

ACTIVIDADES													
		MESES											
DESCRIPCION DE ACTIVIDADES	AÑO	E	F	M	A	M	J	JL	A	S	O	N	D
Estructuración del proyecto	2012												
Muestreo en campo e inicio ensayo hojarasca	2012												
	2013												
	2014												
Trabajo de laboratorio	2012												
	2013												
	2014												
Procesamiento de datos.	2013												
	2014												
Interpretación y análisis de los resultados.	2013												
	2014												
Redacción del documento.	2014												
Revisión y ajuste del documento	2014												

10. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

10.1. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LOS SUELOS ESTUDIADOS

En tabla 2 se incluyen los resultados de las propiedades físicas y químicas de los suelos estudiados (ver los resultados completos en anexo B). Se presentó un rango de color en húmedo entre 10 YR 3/2 y 10 YR 3/4 correspondientes a rojoamarillentos oscuros, típicos de horizontes superficiales influenciados por la presencia de pequeñas cantidades de MO [67] con excepción de la zona 2 en cultivo que fue de 2.5 YR 3/3 y en la zona 3 en bosque que fue de 2.5 YR 3/2; el color en seco presento una variación entre 2.5 YR 4/4 a 2.5 YR 6/3 correspondientes a caférojizo oscuro. En general los suelos se encuentran en un rango de pH de ligeramente acido a moderadamente alcalinos.

Tabla 2. Propiedades de los suelos por zona de estudio

PROPIEDADES	SUELOS CULTIVADOS					SUELOS DE BOSQUE				
	ZONA 1	ZONA 2	ZONA 3	ZONA 4	Media	ZONA 1	ZONA 2	ZONA 3	ZONA 4	Media
COLOR Húmedo	10YR ¾	2.5YR 3/3	10YR 3/2	10YR 3/3		10YR 3/2	10YR 3/3	2.5YR 3/2	10YR 3/3	
COLOR Seco	2.5YR 5/4	2,5YR 5/3	2.5YR 4/4	2.5YR 5/2		2.5YR 4/4	10YR 5/4	2.5YR 6/3	2.5YR 5/3	
Da ($g \cdot cm^{-3}$)	1,49	1,4	1,57	1,45	**1,5**	1,4	1,33	1,46	1,36	**1,4**
% Arena	40,7	62,1	45,3	67,8	**54,0**	65,4	20,3	49,1	59,8	**48,7**
% Arcilla	21,0	22,8	34,2	11,0	**22,3**	23,2	41,1	20,9	18,8	**26,0**
% Limo	38,3	15,1	20,5	21,2	**23,8**	11,4	38,6	30,1	21,4	**25,4**
pH (H_2O)	5,6	6,3	7,1	8,6	**6,9**	6,5	5,6	7,8	8,7	**7,2**
N total (%)	0,23	0,12	0,17	0,12	**0,2**	0,31	0,17	0,15	0,15	**0,2**
P olsen (ppm)	7,98	28,93	18,83	19,91	**18,9**	10,53	13,40	19,07	38,56	**20,4**
C/N	11,4	11,1	11,0	10,9	**11,1**	12,4	9,7	12,0	10,2	**11,1**

La zona 1, con cultivo de café, se caracteriza por tener suelos ligeramente ácidos en contraste con las demás zonas, marcados por la mayor altitud (956 msnm) y mayor pluviosidad (2000 mm), lo que favorece el lavado de bases lo que concuerda con el estudio general de tierras de departamento del Magdalena [32] para los estudios de montaña en clima cálido, ubicados en las estribaciones de la sierra nevada de Santa Marta. Las demás zonas tienen altitudes que no superan los 50 msnm y precipitaciones inferiores a 1300 mm, predominando condiciones de pH en torno a la neutralidad. Los suelos de la zona 4 presentaron condiciones de moderada alcalinidad, la cual se corresponde con su clima y su alta evapotranspiración que excede notablemente a la pluviosidad anual [67]. Según el IGAC [32] las propiedades físicas de estas zonas evidencian procesos de compactación en muchas áreas con valores de Da que alcanzan 1.7 g/cm^3, situación que no se reflejó en los suelos del presente estudio. La zona 3 fue la que presento mayor Da con un valor de 1,57 g/cm^3.

Las relaciones C/N para los suelos de cultivo oscilaron entre 10,9 y 11,4, y para suelos de bosque entre 10,2 y 12,4, estos valores son consecuentes con la alta tasa de mineralización reportada para las condiciones climáticas de la región [32].

Se presentaron valores medios de N total a pesar de las altas dosis de fertilizantes nitrogenados que se aplican en la región a los cultivos de café, banano y palma, lo que concuerda con lo descrito por el Instituto Colombiano agropecuario [29]; no obstante, en la zona 1, es donde se presentan los mayores porcentajes de N debido a las condiciones de temperatura, precipitación y las considerables entradas de material vegetal de acuerdo a lo descrito por Vásquez [67].

El contenido P es moderado en las diferentes zonas, probablemente debido a la alta fijación de este elemento que se presenta en muchos de los suelos de clima cálido seco del departamento del Magdalena [32].

10.2. FORMAS Y CONTENIDOS DE CARBONO EN SUELOS ESTUDIADOS

10.2.1. Formas de carbono

En términos generales, los contenidos de Ct (figura 4) son mayores en los suelos de bosques que en los suelos cultivados para todas las zonas en contraste con la zona 3. Estos resultados corroboran algunos estudios en Colombia tales como los de Moreno [43] quien al trabajar con inceptisoles y entisoles del departamento de Antioquia, encontraron que el CO en suelos de bosques primarios fue superior al de suelos de áreas intervenidas y de bosques secundarios; no obstante en los estudios realizados por Carvajal [13] en suelos de distintos usos en paisajes andinos colombianos se observó una tendencia diferente ya que para muchos perfiles (0-30 cm), los suelos tenían ganancias de C cuando las coberturas vegetales naturales (relictos de selva) se trasformaron en cultivos, principalmente café y plátano: mientras que se observaron reducciones considerables cuando los cultivos se convirtieron en pasturas.

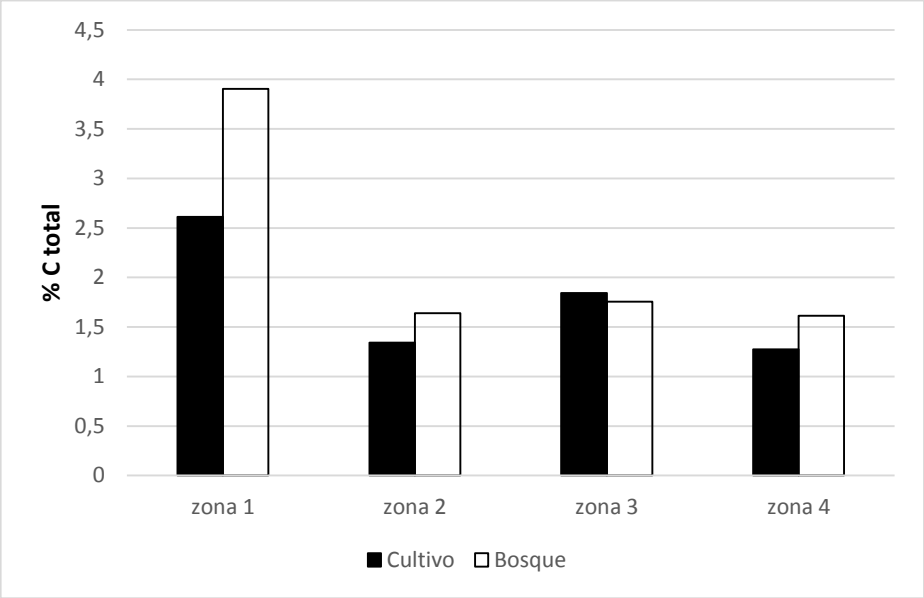


Figura 4. Porcentaje de carbono total en las diferentes zonas de estudio

En la tabla 3 se observa que la zona 1 es la que presenta el mayor porcentaje en formas de C tanto en bosque como en cultivo, en contraste con la zona 4 que presentó los valores más bajos en todas sus formas, esto se debe posiblemente a las condiciones de clima, pluviosidad y altura de las mismas. En la zona 3 también se evidencias que los valores de Cox y Cp son mayores en los suelos de cultivo debido posiblemente al gran retorno de material vegetal al suelo en el manejo agronómico del cultivo de banano, acorde a lo descrito por Ridley [51], que encontraron que niveles de C en praderas de suelos naturales fueron superados por los de cultivo en la zona; en el mismo sentido Mosquera [44] trabajando en suelos de la Amazonía colombiana encontró almacenamientos de C mayores en suelos de pradera que en suelos forestales nativos. No obstante en nuestro caso las formas de C más estables como Cnox fueron siempre mayores o iguales como se presenta en la zona 1 en suelos de bosques, reiterando la mayor capacidad natural de los suelos de bosques para capturar y estabilizar C [38].

Tabla 3. Porcentaje de formas de carbono por cada zona de estudio

Formas de C	ZONA 1	ZONA 2	ZONA 3	ZONA 4	Media
		CULTIVO			
Ct %	2,61	1,34	1,84	1,28	**1,77**
Cp %	0,81	1,00	0,53	0,45	**0,70**
Cnox	0,05	0,04	0,10	0,02	**0,05**
Cox %	2,57	1,31	1,74	1,26	**1,72**
		BOSQUE			
Ct %	3,90	1,64	1,76	1,62	**2,23**
Cp %	1,15	0,63	0,34	0,49	**0,65**
Cnox	0,05	0,02	0,13	0,10	**0,07**
Cox %	3,85	1,62	1,63	1,52	**2,16**

En cuanto a la relación de las diferentes formas de C estudiadas con respecto al Ct tabla 4, vemos como el Cox para suelos de bosque representa un 95 % y para

cultivos un 97 % del Ct siendo la diferencia entre ambos de aproximadamente 1 %; de un 3 a 5 % constituye la forma Cnox o C con una relativa estabilidad que garantiza considerables tiempos de residencia en los suelos; ante la escasa importancia cuantitativa de esta fracción y dada su relevancia en procesos como la retención de agua y contaminantes, la capacidad de cambio y la formación de agregados estables de elevada resistencia a la erosión se incrementa la necesidad de emprender acciones para protegerla o adicionarla [67].

Tabla 4. Relación entre contenidos de las diferentes formas de carbono en los suelos de estudio

Relaciones	ZONA 1	ZONA 2	ZONA 3	ZONA 4	Media
		CULTIVO			
Cox/Ct	0,983	0,977	0,943	0,985	**0,97**
Cnox/Ct	0,017	0,022	0,057	0,015	**0,03**
Cp/Ct	0,307	0,771	0,292	0,372	**0,44**
Cp/Cox	0,313	0,767	0,304	0,358	**0,44**
		BOSQUE			
Cox/Ct	0,987	0,987	0,936	0,903	**0,95**
Cnox/Ct	0,012	0,013	0,064	0,097	**0,05**
Cp/Ct	0,321	0,405	0,196	0,366	**0,32**
Cp/Cox	0,299	0,391	0,210	0,320	**0,30**

El Carbono ligado a la fracción húmica y a formas muy lábiles Cp, representó el 44 % del Cox en suelos de cultivo y el 30 % en suelos de bosques; si analizamos la fracción de C oxidable no extraíble con pirofosfato (Cox-Cp), debe atribuirse a las fracciones que ya han escapado a la actividad biológica, e incluso a los procesos oxidativos normalmente existente en los suelos, en donde su potencial redox (Eh: 300-500 mvol, en suelos bien drenados) es muy inferior al existente en condiciones del método utilizado para extraer la fracción Cox (Eh: > 1000 mvol.) [38]. La zona 2 cultivo de palma presento con un 77 % del Cox representado por el Carbono extraíble con pirofosfato quien presenta los suelos con mayores

contenidos de fracciones de C lábiles; quedando demostrado el efecto del uso y manejo de los suelos de este cultivo en los contenidos de las formas más estables de C.

10.2.2. Contenidos de carbono

En la tabla 5 se presenta la acumulación de las diferentes formas de C a 20 cm de profundidad en el suelo [67] la cual se estimó a partir de la concentración de C y la Da del suelo. La acumulación promedio de las formas de C estudiadas fue mayor en los suelos de bosques que en los suelos de cultivo, excepto la forma de Cnox.

Tabla 5. Acumulación de carbono en los primeros 20 cm de profundidad Ton/ha

Formas de C	ZONA 1	ZONA 2	ZONA 3	ZONA 4	Media
		CULTIVO			
Ct	78,1	37,6	58,0	36,9	**52,7**
Cp	24,1	28,1	16,7	13,0	**20,5**
Cnox	1,3	1,0	3,1	0,5	**1,5**
Cox	76,8	36,6	54,8	36,4	**51,2**
		BOSQUE			
Ct	109,1	43,7	51,1	43,8	**61,9**
Cp	32,2	16,9	10,0	13,2	**18,1**
Cnox	1,5	0,5	3,6	2,6	**2,0**
Cox	107,6	43,2	47,5	41,2	**59,9**

En la misma Tabla se observa que en los sitios de bosques en la zona 2 los valores de Cox son semejantes a los de la zona 3 y 4 debido posiblemente a la condición de bosque seco tropical [67]. En las zonas se presentaron valores muy bajos Cp, lo que evidencia poca evolución de MO hacia formas humificadas, posiblemente por el efecto de las practicas agronómicas en cada uno de ellos, lo que contrasta con valores de Cnox influenciado, quizás, por una baja actividad microbiana. Se puede evidenciar que la zona 1 presenta los valores más altos de

contenidos de C debido a los condiciones de bosque húmedo tropical que favorecen la captura del mismo [21].

Para los porcentajes de pérdidas de Ct (anexo C) en relación con el uso del suelo partiendo del supuesto que la condición original es la determinada por los suelos de bosques, se observó entonces que las mayores pérdidas de Ct (28 %) ocurren en los suelos de la zona 1 cultivados con café esto puede deberse a las prácticas agrícolas que se manejan en este tipo de cultivo. Calvo de Anta [10] en suelos de la provincia de la Coruña (España) encontraron que los suelos cultivados presentan pérdidas de C entre 26 y el 49 % en relación con los suelos de bosque. Bayer [4] en el sur de Brasil en suelos Hapludox encontró que el CO lábil y el humificado son más estables en sistemas de siembra ligera y consecuentemente menos vulnerables a la mineralización.

10.3. DESCOMPOSICIÓN DE HOJARASCA

10.3.1. Porcentaje de descomposición de hojarasca

La dinámica de la descomposición de la hojarasca se muestra en la figura 5, los valores para el mes 1 oscilaron entre el 2 % y el 23 %, siendo la zona 2 la que obtuvo el mayor porcentaje de descomposición. Hasta el mes 3 del ensayo las zonas 1, 2 y 3 presentaron tendencias parecidas en el proceso de descomposición de la hojarasca, en el mes 4 se presentó variación en la descomposición del material, la zona 1 alcanza un 42 % de descomposición y la zona 4 mantiene el porcentaje más bajo alcanzando un 7 %, esta situación puede ser debida a la fauna del suelo propia de cada zona; estudios realizados en Codazzi Cesar, se comprobó que las características edafológicas del suelo contribuyen a la descomposición de la hojarasca de los bosques, al igual que los micro, meso y macroorganismos. [6]. En el mes 6 se observa que el comportamiento de descomposición de la hojarasca en todas las zonas mantiene una tendencia de

crecimiento zona1 (60 %), zona 2 (43 %), zona 3 (50 %), sin embargo en la zona 4 el proceso de descomposición presenta un crecimiento mínimo (11 %).

En la última recolección del ensayo que representa el acumulado del porcentaje de descomposición de la hojarasca en los 9 meses, se observó que la zona 1 obtuvo el 90 % de descomposición, en contraste con la zona 4 que solo alcanzó el 16 % de descomposición del material vegetal (figura 5) (ver los datos completos de descomposición en anexo D). Esta diferencia del comportamiento de descomposición entre la zona 1 y 4, esta notablemente marcado por las condiciones climáticas y su influencia sobre la actividad de los microorganismos para descomponer los restos vegetales [55]. Factores como la temperatura, humedad y precipitación ofrecen condiciones favorables para la actividad de la biota y por ende de la descomposición de la hojarasca [45].

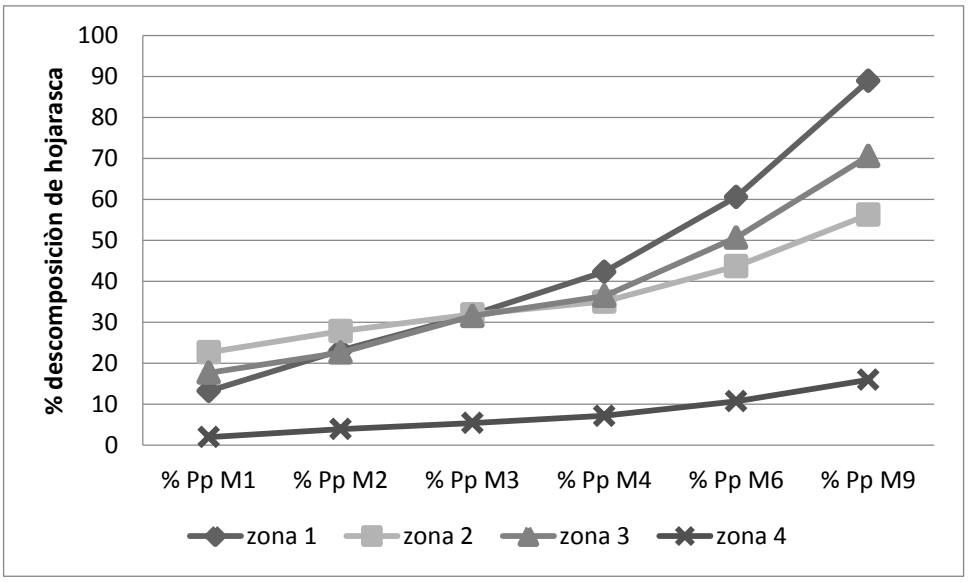


Figura 5. Porcentaje de descomposición de hojarasca por zona de estudio

La figura 6 muestra el comportamiento de descomposición de la hojarasca por usos del suelo en cada zona, destacando los suelos de bosque con mayor porcentaje de descomposición del material vegetal. Además se observa que el comportamiento del porcentaje de descomposición de hojarasca es similar en los usos del suelo al interior de cada zona, a excepción de la zona 3, donde se muestra una marcada diferencia: suelos de bosque (81,5 %) y suelos de cultivo (59,5 %). Los procesos de descomposición de la hojarasca en la zona 3 tal vez, están regulados por la calidad del material vegetal y los cambios microclimáticos influenciados por el manejo de los suelos [45]. Estos favorecen los sistemas edáficos, generando los medios adecuados para el desempeño de micro y macroorganismos sobre el material en descomposición [13].

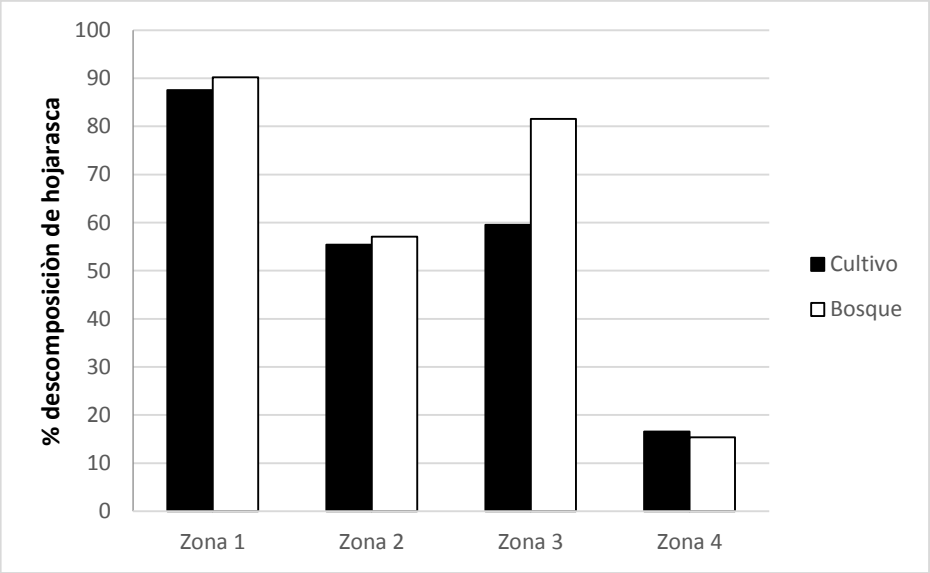


Figura 6. Porcentaje de descomposición de hojarasca acumulado (9 mes) por uso del suelo

El análisis estadístico de los datos de la descomposición de la hojarasca presentó en términos generales valores medios entre el 11 % y el 60 %, la evaluación del coeficiente de variación estuvo en el rango del 46 % al 60 %, mostrando un comportamiento normalmente heterogéneo [66]. Según el MANOVA (anexo E) el estudio presentó diferencias estadísticas en los porcentajes de descomposición de la hojarasca entre zonas para todos los meses, este comportamiento puede estar asociado a las condiciones climáticas y la diversidad biológica del suelo de cada zona. Siendo estos componentes dominantes, afectando directamente los procesos de descomposición del material vegetal [13]. Estudios relacionados destacan las condiciones de temperatura, humedad y precipitación como los principales factores que influyen en el desarrollo de la vegetación y la actividad microbiana, al igual que la biodiversidad de los suelos y la biota que constituye la microflora y la fauna del suelo de cada sitio [45, 56].

Las características edafológicas y climáticas de los sitios favorecen la densidad de los microorganismos, lo que proporciona mayor población para los procesos de descomposición de la hojarasca [13]. La cantidad de residuo vegetal, sus propiedades y composición, son estímulos esenciales para que los microorganismos actúen y descomponga la hojarasca [56].

Los resultados de la interacción zonas*usos para los diferentes porcentajes de descomposición de la hojarasca que se presentan en la tabla 6, corrobora el efecto de las diferencias que se dan entre usos del suelo, la prueba Tukey para el mes 9 del ensayo permitió clasificar para suelos de cultivo 3 subgrupos (zona 1, zona 2 y 3, y zona 4) y para suelos de bosque diferenciar un comportamiento distinto en cada zona, así mismo al interior de cada zona está permite concluir que solo se presentaron diferencias estadísticas significativas en la zona 1 y 3.

Tabla 6. Porcentajes de descomposición de hojarasca para zonas y usos del suelo

			CULTIVO			
Tratamiento	**Zona 1**	**Zona 2**	**Zona 3**	**Zona 4**	**Media**	**CV**
% Pp M1	15,124 b	26,867 a	18,535 b	2,382 d	15,083	61,382
% Pp M2	21,439 c	27,434 a	21,381 c	4,531 d	18,333	49,521
% Pp M3	30,772 c	32,711 bc	28,310 d	6,288 e	23,917	46,541
% Pp M4	42,625 a	37,835 b	33,700 c	7,409 d	30,000	47,610
% Pp M6	59,899 ab	44,137 c	43,830 c	11,280 d	39,333	46,808
% Pp M9	87,549 ab	55,389 c	59,557 c	16,532 d	54,250	48,821
			BOSQUE			
% Pp M1	11,350 c	18,512 b	16,846 b	1,530 d	11,583	60,985
% Pp M2	24,774 b	28,253 a	23,836 b	3,313 d	19,667	51,915
% Pp M3	32,978 b	31,162 bc	34,750 a	4,544 e	25,417	51,119
% Pp M4	42,026 a	32,286 c	39,090 b	6,899 d	29,667	48,536
% Pp M6	61,254 a	43,234 c	57,540 b	10,139 b	42,583	49,416
% Pp M9	90,223 a	57,104 c	81,535 b	15,340 d	60,583	50,325

Prueba Tukey interacción zona*uso, P≤ 0,05, % Pp M: pérdida de peso de hojarasca por mes, CV: coeficiente de variación,

10.3.2. Respiración del suelo y su relación con la tasa de descomposición de hojarasca

La tabla 7 muestra la correlación positiva de los datos de respiración del suelo (expresada en µg C-CO_2/h*g.suelo), en relación a la descomposición de la hojarasca, no obstante en el mes 1 no presentó correlación positiva entre los datos, esta situación se debe a que la actividad microbiana es poco apreciable por el corto tiempo al que ha estado expuesto el material vegetal.

Tabla 7. Análisis de correlación entre tasa de descomposición de hojarasca y respiración del suelo

Tratamiento	Respiración significancia.	Probabilidad
% Pp M1	0,3558	0,1972
% Pp M2	0,0037	0,5693
% Pp M3	0,0062	0,542
% Pp M4	0,0041	0,5638
% Pp M6	0,0037	0,5692
% Pp M9	0,0036	0,5708

% Pp M: pérdida de peso de hojarasca por mes, correlación de Pearson P≤ 0,05

La figura 7 expresa la interacción de descomposición de hojarasca en el mes 9 del ensayo y la respiración del suelo (expresada en µg C-CO_2/h*g.suelo), entre zonas. La variación de los datos de respiración con respecto a la descomposición de hojarasca en cada zona presento un rango mínimo de diferencia, en contraste la zona 3 arrojo valores con alta diferencia, esto puede deberse a la eficiencia de los microorganismos y posiblemente a la mayor acción de la macro fauna con el material vegetal, aumentando la capacidad de descomposición de la hojarasca [9]. Estudios relacionados afirman que en los ecosistemas tropicales predomina la actividad de la fauna, siendo este factor una función importante en la descomposición del material vegetal, al igual que extiende el área superficial para que los microorganismos puedan realizar los procesos de biodegradación y humificación de los residuos orgánicos, ampliando la residencia del C en el suelo [56].

Sin embargo las condiciones de temperatura y humedad cumplen funciones importantes en el proceso de descomposición del material vegetal, puesto que estos factores regulan la capacidad de los microorganismos para descomponer la hojarasca [45]. Además, estos factores favorecen las condiciones del sustrato, facilitando la acción de la biota sobre el material vegetal, permitiendo que la

actividad microbiana sea eficiente al momento de descomponer los residuos vegetales y abonos animales [55].

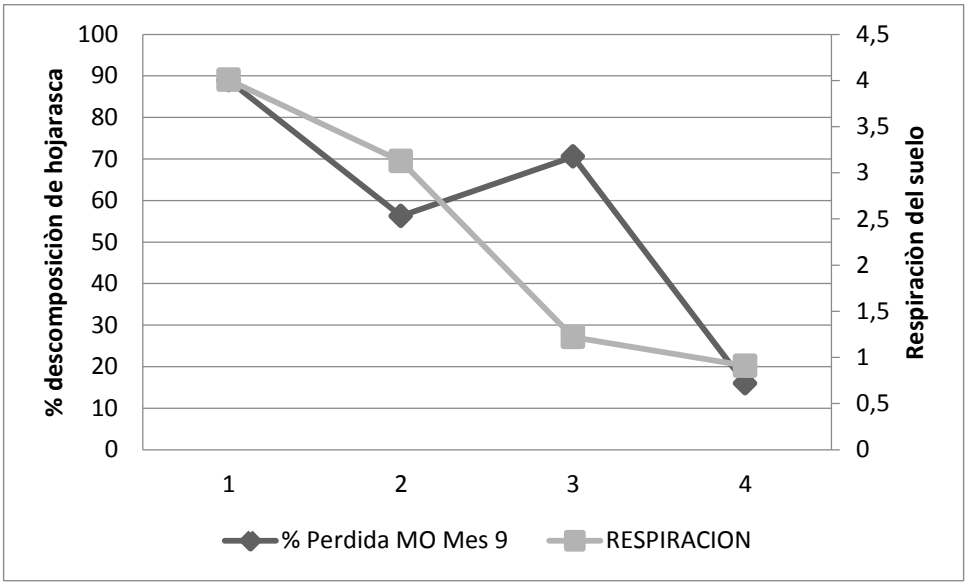


Figura 7. Relación entre respiración del suelo y porcentaje de descomposición acumulado de hojarasca

11. CONCLUSIONES

El manejo y el uso de los suelos en las zonas estudiadas es un factor clave que influye en los contenidos y formas de carbono. Así mismo los almacenamientos de carbono en el suelo varían con la altura sobre el nivel del mar.

La fracción de Cox representa más del 90% del Ct en todas las zonas del estudio, mientras que los contenidos de Cp fueron bajos, lo que muestra una poca evolución de la MO a formas humificadas.

Para las zonas de estudio los factores principales que afectaron la tasa de descomposición fueron las condiciones edafoclimáticas (precipitación y temperatura) y su incidencia en la actividad microbiana.

Para las condiciones del estudio la respiración del suelo está correlacionada positivamente con la tasa de descomposición de la hojarasca, y esta relación se puede invertir por la intervención activa de la meso y macrofauna del suelo y por la eficiencia de los microrganismos en la descomposición de un determinado sustrato.

Bajas tasas de descomposión de hojarasca están asociadas a zonas con altas temperaturas (> 28 °C) y escasa actividad microbiana influenciada por la poca o casi nula reserva de humedad en el suelo.

12. RECOMENDACIONES

Las experiencias adquiridas en el proceso de investigación, generaron las siguientes recomendaciones:

Para mayor profundidad de este proyecto, se recomienda acompañar esta investigación con un estudio de reconocimiento de la fauna del suelo de las zonas donde se realizaron los ensayos.

Estudiar el modelo de gestión de residuos orgánicos aplicados en los suelos cultivados con palma para corroborar el efecto de estos sobre el incremento de formas de C asociadas a la fracción húmica del suelo.

Teniendo en cuenta las variaciones climáticas de las zonas de estudio, se recomienda extender la investigación en dos ciclos para mayor análisis de los datos; época de lluvia y época seca.

13. BIBLIOGRAFÍA

1. AGUILERA, S.M., 2000. Importancia de la protección de la materia orgánica en suelos. Simposio Proyecto Ley Protección de Suelo. Boletín N° 14.Valdivia, Chile. p. 77–85.

2. BASCOMB, 1968. Metodología utilizada para la determinación del carbono ligado a la fracción húmica del suelo (C pirofosfato).

3. BATJES, N.H. 2005. Soil carbon stocks of Jordan and projected changes upon improved management of croplands. Geoderma 132, 361- 371.

4. BAYER, C. 2002. Carbono stocks in organic matter fracctions as affected by land use and soil management, with emphasis on no-tillage effect. Santa María, Ciencia Rural 32 (3), 401 - 406.

5. BERNHARD, R. & SCHWARTZ D., 1997. Change in lignin content during litter decomposition in tropical forest soils (Congo): Comparison of exotic plantations and native stands. Earth. Planet. Sci. Lett. 325, 427 – 432.

6. BONILLA R., RONCALLO B., JIMENO J. & GARCIA T., 2008. Producción y descomposición de la hojarasca en bosques nativos y de Leucaena sp., en Codazzi, Cesar. *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria,* 9(2), 5-11.

7. BRADY, N.C. & WEIL, R.R., 2002. The nature and properties of soils. 13th Ed. New Jersey: PrenticeHall. p. 720 - 725.

8. BREMER E., JANZEN H.H. & JOHNSTON A.M., 1994. Sensitivity of total, light and ineralizable organic matter to management practices in a Lethbridge soil. *Can. J. Soil Sci.* 74, 131–138.

9. BURBANO H. & SILVA F., 2010. Ciencias del suelo, principios básicos. Capitulo: organismos del suelo, Varela Amanda y Rueda Diana. p 414-419.

10. CALVO A.R., MACÍAS, F. & RIVEIRO, A., 1992. Aptitud agronómica de los suelos de la provincia de La Coruña. Imprenta de la Diputación Provincial. La Coruña. 87 pp.

11. CAMPBELL R. 2005. Ecología microbiana, México Limusa, 68 p.

12. CARVAJAL A., FEIJOO A., QUINTERO H. & RONDÓN M., 2009. Carbono orgánico del suelo en diferentes usos del terreno de paisajes andinos colombianos. R.C. suelo nutrición vegetal. 9(3): 222-235.

13. CASTELLANOS J.B. & LEÓN J.D., 2010. Producción, descomposición y retorno de nutrientes de hojarasca en plantaciones de Acacia mangium establecidas en suelos degradados del Bajo Cauca (Colombia). Biología tropical. 59 (1).

14. CONSTANZA R., ARGE R., GROOT R., FARBER S., GRASSO M., HANNON B., KLIMBURG, NAEEM S., O'NEILL R., PARUELO J., RASKIN R., SUTTON P. & DENBELT M., 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. Nature 387.

15. COP17-2011. United nations. Framework Convention on Climate Change http://unfccc.int/meetings/durban_nov_2011/meeting/6245.php. Consultado el 22 de abril de 2014.

16. DIXON R.K., BROWN S., HOUGHTON R.A., SOLOMON A.M., TREXLER M.C. & WISNIEWSKI J., 1994. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. Science 263: 185-190.

17. ELLERT, B.H. & GREGORICH E.G., 1995. Management- Induced changes in the actively cycling fractions of soil organic matter. In “McFee, W. And Kelly, J. M (eds.)” Carbon forms and function in forest soils. *Soil Science of America,* Inc., Madison, 119-138.

18. ENA, 2007. Encuesta Nacional Agropecuaria.

19. FAO, 2001. Soil carbon sequestration for impoved land management. World soil reports 96. Rome, 58 p.

20. FAO, 2002. Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. Informes sobre recursos mundiales de suelos. Roma, 83 p.

21. FAO, 2004. Carbon sequestration in dryland soils. World soil reports 107. Rome, 129 p.

22. FELDPAUSCH T.R., RONDÓN M.A., FERNANDES E.C.M., RIHA, S.J. & WANDELLI E. 2004. Carbon and nutrient accumulation in secondary forests regenerating from degraded pastures in Central Amazônia, Brazil. Ecological Applications 14, 164-176.

23. FISHER, R.F., 1995. Soil organic matter: Clue or Conundrum. In “McFee, W. And Kelly, J. M (eds.)” Carbon forms and function in forest soils. Soil Science of America, Inc., Madison.1-11.

24. GALANTINI J.A., 2002. Contenido y calidad de las fracciones orgánicas del suelo bajo rotaciones con trigo en la región semiárida pampeana. INTA, Argentina. RIA, 30, 125-146.

25. GHANI, A., DEXTER M. & PERROT K.W., 2003. Hotwater extractable carbon in soils: a sensitive measurement for determining impacts of fertilisation, grazing and cultivation. Soil Biology and Biochemistry. 35, 655-665.

26. HAYES M.H.B. & CLAPP C.E., 2001. Humic substances: considerations of compositions, aspects of structure, and enviromental influences. Soil Science, 166, 723–737.

27. HAYNES R.J. & NAIDU R., 1998. Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: a review. Nutrient Cycling in Agroecosystems. 51, 123-137.

28. HERBERT B.E. & BERTSCH P.M., 1995. Characterization of dissolved and colloidal organic matter in soil solution: A review. In “McFee, W. And Kelly, J. M (eds.)” Carbon forms and function in forest soils. *Soil Science of America, Inc.*, Madison. 63-88.

29. ICA, 1992. Instituto Colombiano Agropecuario. Manual del laboratorio de suelos. 218 pp.

30. IDEAM, 2005. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia Actividades Para el Cambio Climático en Colombia.

31. IGAC, 2006. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Métodos analíticos del laboratorio de suelos. p. 720 - 725.

32. IGAC, 2009. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Estudio general de suelos y zonificación de tierras del Departamento del Magdalena. 496 pp.

33. KUHLBUSCH, T.A.J, 1998. Black carbon and the carbon cycle. *Science*, 280, 1903-1904

34. LAL R., 2001. Soil Carbon Sequestration and the Greenhouse Effect. SSSA Special Publication Number 57

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

36. LEIFELD J., BASSIN S. & FUHRER J., 2005. Carbon stocks in Swiss agricultural soils predicted by land-use, soil characteristics and altitude. Agriculture, Ecosystems and Environment 105, 255-266

37. LÓPEZ M., VELDKAMP E. & DE KONING G.H.J., 2005. Soil carbon stabilization in converted tropical pastures and forests depends on soil type. Soil Science Society of America Journal 69 (4), 1110-1117.

38. MACÍAS F., CALVO A.R., RODRIGUEZ L., VERDE R., PENA X., & CAMPS M., 2004. El sumidero de carbono de los suelos de Galicia (España). Edafología 11 (3), 341–376

39. MACIAS F. & CAMPS M., 2005. Suelo y Cambio Climático: Capacidad de Fijación de Carbono en sistemas edáficos. Serie Medio Ambiente. 6.

40. MARTÍNEZ E., FUENTES J. & ACEVEDO E., 2008. Carbono orgánico y propiedades del suelo En: Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal. 8 (1), 68-96.

41. MCVAY C.W. & RICE, 2005. Management effects on soil physical properties in long-term tillage studies in Kansas. Soil Science. Society. America. Journal. 70, 434-438

42. MONTERROSO C., GIL A., PÉREZ S. & MACÍAS F., 2004. Restauración de suelos de mina: contribución a la fijación de carbono en el ecosistema terrestre. Edafología. 11 (2), 135-149.

43. MORENO F.H. & LARA W., 2003. Variación de Carbono Orgánico del suelo de bosques primarios y secundarios. En: Medición de la captura de carbono en ecosistemas forestales tropicales de Colombia. S.A. 50 p.

44. MOSQUERA O., BUURMAN P., RAMIR B.L. & AMEZQUITA M.C., 2012. Carbon stocks and dynamics under improved tropical pasture and silvopastoral systems in Colombian Amazonia. *Geoderma, 189–190*, 81–86.

45. MORETTO A., LÁZZARI A. & FERNÁNDEZ O., 2005. Calidad y cantidad de nutrientes de la hojarasca y su posterior mineralización en bosques primarios y bajo manejo con distintos sistemas de regeneración. Módulo Lenga , Subproyecto 5 PIARFON BAP.

46. MURCIA M. & OCHOA M., 2008. Respiración del suelo en una comunidad sucesional de pastizal del Bosque Altoandino en la cuenca del río Pamplonita, Colombia. Caldasia 30 (2): 337-353.

47. PARSSONS J.W., 1989. Hydrolytic degradations of humic substances. In: “Humic substances II- In Search of Structure (ed. M.H. B. Hayes; P. MacCarthy, R.L. Malcolm and R.S, Swift), pp. 99-120. *Wiley*, Chichester.

48. PAUSTIAN K., SIX J., ELLIOTT E.T. & HUNT H.W., 2000. Management options for reducing CO_2 emissions from agricultural soils. Biogeochemistry 48, 147–163.

49. RAICH, J.W. & SCHLESINGER W.H., 1992. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relation to vegetation and climate. 44B, 81-99.

50. REICOSKY D.C., 2002. Long Term Effect of Moldboard Plowing on Tillage. Induced CO_2 Loss, in J. M. Kimble, R. Lai and R. F. Follet: Agricultural Practices and Polices for Carbon Sequestration in Soil. Lewis Publishers. Papers form symposium held July 1999 at Ohio State University, Columbus, Ohio, 87-96 p.

51. RIDLEY A.M., HELYAR K.R. & SLATTERY W.J., 1990. Soil acidification under subterranean clover (Trifolium subterraneaum L.) pastures in North-Eastern Victoria. *Aust. J. Exper. Agric., 30*, 195–201.

52. ROSELL R.A., 1999. Materia orgánica, fertilidad de suelos y productividad de cultivos. Proceed. XIV Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. Pucón, Chile.

53. ROBERT L., 2008. EL CICLO DEL CARBONO: Midiendo el flujo del CO_2 del suelo.

54. SAMPSON N., 2004. Agricultural and Forestry Carbon Sequestration Projects: Challenges for Credible Registration.

55. SÁNCHEZ S., CRESPO G. & HERNANDEZ M., 2009. Descomposición de la hojarasca en un sistema silvopastoril de Panicum maximum y Leucaena leucocephala (Lam) de Wit cv. Cunningham. II. Influencia de los factores climáticos. Pastos y Forrajes, 32 (4).

56. SÁNCHEZ S., CRESPO G., HERNANDEZ M & GARCIA Y., 2008. Factores bióticos y abióticos que influyen en la descomposición de la hojarasca en pastizales. Pastos y Forrajes, 31 (2)

57. SCHLESINGER W.H., 2000. Biogeoquímica: un análisis global. Ariel Ciencia, Barcelona, España.

58. SIMPSON A.J., SONG G., SMITH E., LAM B., NOVOTNY E.H. & HAYES M.H.B., 2007. Unraveling the Structural components of soil humin by use of solution-state nuclear magnetic resonance spectroscopy. Environ. Sci. Technol., 41, 876-883.

59. 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, 155-176.

60. SSSA 1987. Soil organic matter: Analysis and Intepretation. SSSA Special Publication. 46, Madison.

61. STEVENSON F.J., 1994. Humus Chemistry. Genesis, Composition, Reactions. John Wiley & Sons. Second Edition.

62. SUNDARAPANDIAN S.M. & SWAMY P.S., 1999. Litter production and leaf-litter decomposition of selected tree species in a tropical forest at Kodayar in the western Ghats, India. Forest Ecol. Manag. 123, 231-244.

63. SWIFT R.S., 2001. Sequestration of carbón by soil. Soil Sci., 166, 858-871.

64. TABATABAI M.A., 1987. Soil organic matter testing: An Overview. In “SSSA (1987). Soil organic matter: Analysis and Intepretation. *SSSA Special Publication* 46. Madison, 1-10.

65. VANCE E.D., BROOKES P.C. & JENKINSON D.S., 1987. An extraction method for measuring soil microbial biomass. C. Soil Biology and Biochemistry, 19, 703-707.

66. VÁSQUEZ J.R. & BAENA D., 2009. Caracterización de la variabilidad espacial de las propiedades físicas y químicas en los suelos de la granja experimental de la Universidad del Magdalena. 103 pp.

67. VASQUEZ J. & MACÍAS F., 2011. Formas de carbono orgánico en suelos con diferentes usos en el departamento del Magdalena (Colombia). Revista Acta Agronómica 60(4), 369-379.

68. VASQUEZ J., MACÍAS F. & MENJIVAR J., 2013 Respiración del suelo según su uso y su relación con algunas formas de carbono en el Departamento del Magdalena, Colombia. Decanato De Agronomía 25 (3) p.175 – 180.

69. VEENENDAAL E., KOLLE O. & LLOYD J., 2004. Seasonal variation in energy fluxes and carbon dioxide exchange for a broad-leaved semi-arid savanna (Mopane woodland) in Southern Africa. Global Change Biol. 10, 318-328.

70. WALKLEY B., 1934. Metodología utilizada para la determinación del carbono oxidable.

71. WEST T.O., 2008. Net Sequestration Carbon in Agriculture: A national Assessment. Environmental Sciences Division, Oak Ridge National Laboratory. pp. 1– 6

72. WEST, T.O, MARLAND, G., 2003. Net carbon flux from agriculture: carbon emissions, carbon sequestration, crop yield and land-use change. Biogeochemistry, 63, 73-83.

73. WEST, T.O., POST, W.M., 2002. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rortation: A global data analysis. Soil Sci. Soc. Am. J. 66, 1930-1946.

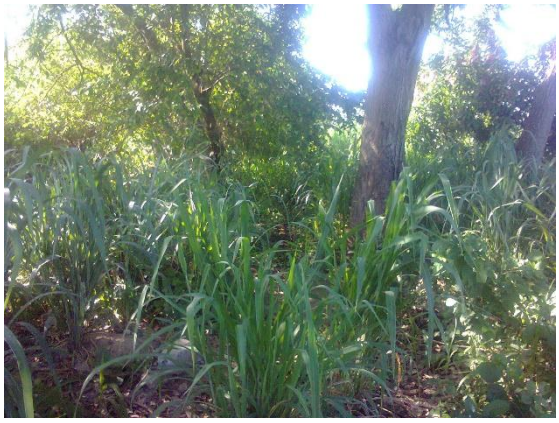
74. WIEDER R.K. & LANG G.E., 1982. A critique of the analytical methods used in examining decomposition data obtained from litter bags. Ecology 63, 1636-1642.

ANEXOS

Anexo A. Fotografías de la ejecución de la metodología

Zonas de estudios donde se efectuaron los muestreos.

Cultivo palma



Bosque palma

Cultivo de café

Bosque café

Cultivo de banano

Bosque banano

Cultivo de Jatrofa

Bosque granja unimag

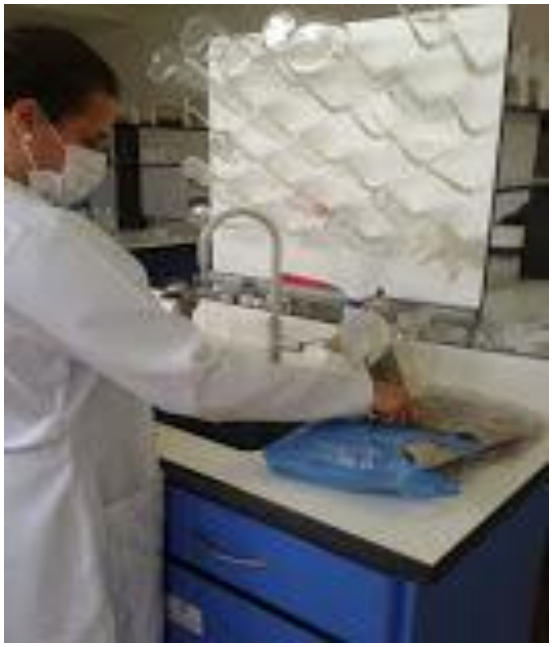
Análisis de laboratorio de formas y contenidos de carbono

Descomposición hojarasca

Preparación del material a descomponer

Bolsas en sitio

Análisis de laboratorio de tasa de descomposición de hojarasca



Anexo B. Propiedades físicas y químicas de los suelos estudiados

ZONAS	US0S	pH	C/N	P Olsen (mg/Kg)	TEXTURA %Arena	%Arcilla	%Limo	Da (g/cc)
1	Café	5,6	11	6,12	38,99	10,75	50,27	1,40
		5,9	13	9,17	41,27	21,35	37,39	1,5
		5,6	10	7,30	43,28	28,61	28,11	1,48
	Bosque	5,3	12	9,35	39,35	23,12	37,53	1,60
		6,3	13	10,81	64,69	26,48	8,83	1,30
		6,5	11	8,94	58,99	32,67	8,35	1,40
		6,9	12	11,36	85,65	12,55	1,80	1,39
2	Palma	6,3	14	10,99	52,32	20,99	26,69	1,50
		6,2	10	30,54	55,89	19,67	24,44	1,36
		6,6	13	58,34	68,75	21,71	9,55	1,47
		6,3	10	18,51	66,76	30,15	3,09	1,37
	Bosque	6,1	12	8,30	56,97	19,67	23,36	1,40
		5,3	9	4,79	19,71	70,15	10,15	1,36
		6,5	9	39,16	13,76	29,19	57,05	1,38
		4,8	11	6,34	28,87	24,44	46,69	1,31
3	Banano	5,9	10	3,29	18,99	40,63	40,39	1,28
		7,0	12	14,73	46,13	34,20	19,67	1,48
		6,6	11	28,72	48,75	33,96	17,29	1,43
		7,0	11	24,98	47,09	27,65	25,25	1,60
	Bosque	7,0	11	23,30	39,23	41,11	19,67	1,65
		7,6	13	10,26	54,93	24,20	20,87	1,53
		7,5	12	29,27	32,40	46,66	20,94	1,46
		8,3	11	26,21	60,43	7,17	32,40	1,43
4	Hortalizas	7,8	12	10,54	48,51	5,49	46,00	1,40
		8,5	11	17,83	60,91	10,63	28,47	1,53
		8,5	9	9,12	73,52	7,65	18,83	1,47
		8,7	13	29,91	70,67	18,01	11,32	1,39
	Bosque	8,7	9	22,80	66,13	7,77	26,09	1,40
		9,5	7	15,23	65,08	13,36	21,56	1,39
		8,4	13	90,51	60,07	14,20	25,73	1,35
		8,4	9	9,94	58,41	30,75	10,84	1,31
		8,5	12	38,56	55,65	16,69	27,65	1,37

Anexo C. Porcentajes de pérdidas de carbono total

	PÉRDIDAS Y GANANCIAS DE CARBONO (%)				
Formas de C	**ZONA 1**	**ZONA 2**	**ZONA 3**	**ZONA 4**	**Media**
Ct	-28,41	-13,99	13,47	-15,63	**-11,1**
Cox	-28,67	-15,27	15,33	-11,56	**-10,0**
Cp	-25,14	66,42	66,84	-1,26	**26,7**

Anexo D. Porcentajes de descomposion de hojarasca

	CULTIVO				BOSQUE			
Tratamiento	**Zona 1**	**Zona 2**	**Zona 3**	**Zona 4**	**Zona 1**	**Zona 2**	**Zona 3**	**Zona 4**
% Pp M1	1,562	26,577	18,913	2,773	12,341	16,731	16,789	1,642
	14,54	27,242	18,78	2,389	13,084	19,411	17,459	1,507
	15,204	26,782	17,914	1,984	8,625	19,393	16,291	1,442
% Pp M2	21,237	27,08	22,024	4,188	24,157	27,775	23,174	3,623
	22,476	27,171	21,968	4,541	26,271	29,479	24,263	3,018
	20,606	28,051	20,152	4,864	23,894	27,505	24,072	3,299
% Pp M3	31,263	32,705	27,78	5,515	32,775	31,197	35,474	4,534
	30,114	32,607	28,939	6,832	31,803	31,026	34,029	4,484
	30,937	32,822	28,212	6,517	34,358	31,263	34,75	4,614
% Pp M4	41,143	37,574	33,225	7,226	40,466	31,755	39,515	7,096
	42,526	37,189	33,463	7,103	43,19	32,401	38,091	6,588
	44,206	38,732	34,414	7,899	42,422	32,703	39,665	7,013
% Pp M6	57,917	44,5	42,528	10,066	60,382	44,437	56,905	10,27
	60,673	43,399	43,644	11,668	62,235	42,26	58,742	9,748
	61,107	44,514	45,318	12,107	61,147	43,007	56,975	10,402
% Pp M9	84,188	56,085	57,135	14,472	88,279	60,785	81,049	15,452
	88,752	53,982	58,95	17,199	90,99	54,415	82,341	14,761
	89,709	56,1	62,586	17,926	91,402	56,113	81,216	15,81

% Pp M: pérdida de peso de hojarasca por mes

ug C-CO2 /h*g.s: Respiración del suelo en función de la masa del suelo

Anexo E. MANOVA tasa de descomposición de hojarasca

	ZONAS				USOS				ZONAS*USOS			
Tratamiento	**Media cuadrática**	**F**	**Sig.**	**Potencia observada[j]**	**Media cuadrática**	**F**	**Sig.**	**Potencia observada[j]**	**Media cuadrática**	**F**	**Sig.**	**Potencia observada[j]**
% Pp M1	469,437	403,535	,000	1,000	80,711	69,380	,000	1,000	16,915	14,540	,000	,999
% Pp M2	669,779	937,649	,000	1,000	10,897	15,255	,001	,956	6,017	8,423	,001	,972
% Pp M3	1042,844	2466,350	,000	1,000	10,752	25,429	,000	,997	22,314	52,774	,000	1,000
% Pp M4	1480,256	1790,631	,000	1,000	,600	,726	,407	,126	30,009	36,301	,000	1,000
% Pp M6	2802,120	2282,149	,000	1,000	63,599	51,798	,000	1,000	74,768	60,894	,000	1,000
% Pp M9	5767,527	1290,712	,000	1,000	237,693	53,193	,000	1,000	168,041	37,606	,000	1,000

% Pp M: pérdida de peso de hojarasca por mes