

**MODELO EXPLICATIVO DEL SERVICIO ECOSISTÉMICO DE
ALMACENAMIENTO DE CARBONO BAJO DIFERENTES USOS DEL SUELO
DENTRO DE UNA CUENCA ANDINA**



MARIA CRISTINA ORDOÑEZ DIAZ

Tesis de Doctorado en Ciencias Ambientales

Director(a):

Miguel Peña Varón

PhD.

Universidad del Cauca

Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y de la Educación

Popayán, diciembre 2016

MARIA CRISTINA ORDOÑEZ DIAZ

**MODELO EXPLICATIVO DEL SERVICIO ECOSISTÉMICO DE
ALMACENAMIENTO DE CARBONO BAJO DIFERENTES USOS DEL SUELO
DENTRO DE UNA CUENCA ANDINA**

**Tesis presentada a la Facultad de Ciencias
Naturales, Exactas y de la Educación
Universidad del Cauca para la obtención del
Título de**

**Doctor(a) en:
Ciencias Ambientales**

**Director:
Miguel Peña Varón PhD.**

**Co-director
Apolinar Figueroa Casas PhD.**

Popayán 2016

Agradecimientos

Luego de años de trabajo y estudio, con orgullo y satisfacción hago un reconocimiento cariñoso a las personas e instituciones que me acompañaron durante este camino e hicieron parte de este logro.

Agradezco al Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación - Colciencias por la financiación de la beca doctoral y el sostenimiento durante mi formación doctoral.

Al Grupo de Estudios Ambientales de la Universidad del Cauca por la financiación del trabajo de campo y análisis de laboratorio, por el compañerismo, la amistad y el apoyo incondicional.

Al Grupo de Agroquímica de la Universidad del Cauca, especialmente a la profesora Isabel Bravo, por la continua asesoría y colaboración y al químico Cristian Samboní por los análisis de muestras de suelos realizados.

A mis profesores y director de tesis por sus asesorías y acompañamiento durante todo mi proceso.

A los jurados de mi tesis por sus aportes y retroalimentación al documento.

A mi familia por ser la fuerza y motivación de mi vida.

Al ingeniero ambiental Juan Fernando Casanova por su colaboración en el trabajo de campo, ayuda en la modelación, la dedicación permanente y por ser mi compañero incondicional.

A la Fundación Río Las Piedras – Acueducto y Alcantarillado de Popayán SA ESP, familia Collazos – Finca Arrayanales y a la Asociación de Campesinos Asocampo por permitir y apoyar la realización del trabajo en la Cuenca del Río Las Piedras-Cauca.

A la Red Interinstitucional de Cambio Climático y Seguridad Alimentaria - Ricclisa por su colaboración en la financiación de la última etapa doctoral.

A Cenicafe, especialmente al profesor Nestor Riaño Ph.D, por la gestión del equipo de medición de respiración de suelos.

Al profesor Leopoldo Galicia Sarmiento Ph.D del Instituto de Geografía de la Universidad UNAM de México y a la profesora Deborah Lawrence Ph.D del

Departamento de Ciencias Ambientales de la Universidad de Virginia EU, por su generosidad al acogerme y por permitirme realizar la pasantía doctoral en sus institutos y retroalimentar mi tesis.

Agradezco especialmente al profesor Apolinar Figueroa Ph.D quien siempre creyó en mí, me impulsó, acompañó y motivó a emprender este camino de conocimiento y academia que ahora es mi vida.

Y al Doctorado en Ciencias Ambientales – Universidad del Cauca por gestionar la realización de la defensa de tesis y acompañar los procesos administrativos.

Contenido

Agradecimientos	3
Contenido.....	5
Lista de figuras.....	9
Lista de tablas	11
Resumen estructurado	13
Structured abstract.....	15
CAPÍTULO 1	17
Introducción.....	17
1.1 Pregunta de investigación:.....	19
1.2 Objetivos	20
1.2.1 Objetivo general.....	20
1.2.2 Objetivos específicos	20
1.3 Justificación	20
1.4 Estructuración de la tesis	22
Capítulo 2.....	23
Marco referencial: estado del arte	23
2.1 Análisis teórico.....	24
2.1.1 Servicios ecosistémicos.....	24
2.1.2 Carbono Orgánico y su función en los suelos.....	29
2.1.3 Rol de la Respiración en los suelos	33
2.2 Estado del arte.....	35
2.2.1 Contexto Nacional e internacional de gestión de carbono	35
2.2.2 Modelos de carbono	37
2.3 Enfoque para el estudio de carbono	40
Capítulo 3.....	45
Metodología	45

3.1 Área de estudio	48
3.1.1 Selección de ventana de estudio	50
3.2 Selección de sitios de muestreo.....	51
3.3 Análisis del sistema social	53
3.4 Diseño de muestreo de las propiedades del suelo.....	55
3.5 Métodos:	55
3.5.1 Análisis de suelos:	55
Estudios físicos.....	55
Análisis químicos.....	56
Análisis Biológico.....	56
3.5.2 Producción de Hojarasca.....	57
3.5.3 Análisis de agua.....	57
3.5.4 Modelación de almacenamiento de carbono en suelos andinos.....	58
Herramienta de modelación.....	59
3. 6 Análisis de datos	60
Capítulo 4.....	63
Interacción del sistema social-natural: desde el enfoque servicio ecosistémico en el área de estudio	63
Capítulo 5.....	71
Análisis de variables cuantificadas en relación con el servicio de almacenamiento de carbono en suelo	71
5.1. Resultados	72
5.1.1 Características físicas entre los tres sistemas de manejo del suelo	72
5.1.2 Características químicas entre los tres sistemas de manejo del suelo ..	75
5.1.3 Características biológicas entre los tres sistemas de manejo del suelo	77
5.1. 4. Relaciones entre las variables suelo.....	78
5.1.5 Respiración en suelos (CO ₂).....	78
5.1.6 Aporte de material orgánico (entradas de carbono al sistema).....	79
5.1.7 Aporte de carbono por procesos hidrológicos.....	79
5.2 Discusión	81
5.2.1 Análisis del uso del suelo y características físicas del suelo	81

5.2.2 Consecuencias del manejo del suelo sobre el almacenamiento de carbono.....	82
5.2.3 Consecuencias del manejo del suelo sobre la actividad metabólica.....	84
5.2.4 Estacionalidad de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo	85
5.2.5 Uso del suelo y emisiones de CO ₂	86
5.2.6 Aporte de material orgánico	88
5.2.7 Aporte de carbono por procesos hidrológicos.....	89
Capítulo 6.....	91
Desarrollo del modelo de carbono	91
6.1. Modelo dinámico de carbono orgánico total en suelos andinos.....	91
6.1.1 Modelo Matemático.....	93
El balance de masa de carbono.	93
6.1.2 Calibración del modelo	100
6.1.3 Verificación del Modelo.....	101
6.2 Análisis de la dinámica de almacenamiento de carbono.....	102
6.3 Análisis del servicio de almacenamiento carbono y las comunidades andinas	105
Conclusiones.....	109
Recomendaciones.....	111
Referencias	113
Anexo 1	137
Anexo 2	139
Anexo 3	143

Lista de figuras

Figura 1. Diagrama del diseño metodológico de la investigación por objetivos específicos	47
Figura 2. Cuenca del Rio las Piedras, ubicación de la microcuenca Arrayanales en la parte alta.....	49
Figura 3. Usos del suelo cuenca del rio Piedras en hectáreas.....	50
Figura 4. Foto pastura natural	51
Figura 5. Foto Cultivo de Forraje.....	52
Figura 6. Bosque Natural Reserva Arrayanales (cuenca del rio Las Piedras).....	53
Figura 7. Modelo conceptual del almacenamiento de carbono en suelo.	59
Figura 8. Elementos básicos del programa Stella	60
Figura 9. Flujo de Carbono Orgánico Total (Kg h^{-1}) en tres usos del suelo para diferentes componentes: R= Respiración (CO_2), P= Precipitación, PC= Percolación, EC= Escorrentía cortical, ES= Escorrentía superficial, Horizonte de suelo A_{00} = Hojarasca y A_1 = Carbono orgánico total (COT) Y características físicas (Humedad del suelo (HS), Densidad aparente (Da), Textura suelo), químicas del suelo (pH, Nitrógeno Total (NT) y Biológicas (actividad microbiana (AM)).	72
Figura 10. Características de las propiedades físicas del suelo durante el tiempo de estudio: A) Densidad Aparente, B) Humedad Higroscópica, C) Humedad del suelo, D) Arena, E) Limo, comparado en tres de usos del suelo: bosque natural (BN), pastura natural (PN) y cultivo de forraje (CF).	75
Figura 11 Características de las propiedades químicas del suelo durante el tiempo de estudio: A) Nitrógeno Total, B) Relación C: N, C) Carbono Orgánico Total, comparado en tres de usos del suelo: bosque natural (BN), pastura natural (PN) y cultivo de forraje (CF).	76
Figura 12. Características de las propiedades biológicas del suelo durante el tiempo de estudio: A) Actividad microbiana, B) Biomasa microbiana C) Coeficiente metabólico comparado en tres de usos del suelo: bosque natural (BN), pastura natural (PN) y cultivo de forraje (CF).	77
Figura 13. Precipitación en mm zona alta cuenca del Rio Las Piedras.....	80
Figura 14. Representación del modelo general de almacenamiento carbono BN en el software Stella®	98
Figura 15. Representación del modelo general de almacenamiento carbono PN en el software Stella®	99
Figura 16. Representación del modelo general de almacenamiento carbono CF en el software Stella®	100

Lista de tablas

Tabla 1. Modelos de carbono	38
Tabla 2. Medias y errores estándar de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo en tres de usos del suelo: pastura natural (PN), cultivo de forraje (CF) y bosque natural (BN).	73
Tabla 3. Comparación de estudios de emisión CO ₂ de suelos con diferentes coberturas	87
Tabla 4. Abreviación de los parámetros para el modelo de carbono en los tres suelos.....	93
Tabla 5. Parámetros del modelo de carbono para los tres usos del suelo	96
Tabla 6. Correlación de Pearson entre las características físicas, químicas y biológicas de los suelos de pastura natural (PN), cultivo de forraje (CF) y bosque natural (BN). N = 216.	137

Resumen estructurado

El estudio de la dinámica del carbono orgánico total (COT) en el suelo es de gran interés, debido a que su almacenamiento y ciclado contribuyen a la fertilidad del suelo y la regulación climática, mediante la disminución de las emisiones de CO₂ a la atmósfera. En este estudio se desarrolló un modelo explicativo de la dinámica de almacenamiento de COT en suelos con tres coberturas vegetales: pastura natural (PN) (*Holcus lanatus*), cultivo de forraje (CF) (*Pennisetum purpureum*) y bosque natural (BN) (dominado por *Quercus humboldtii*), ubicadas en la cuenca alta del río las Piedras, Popayán, Cauca. Inicialmente se definió el modelo causal de almacenamiento de carbono, a partir de lo cual se definieron los principales elementos del estudio. Seguidamente, se seleccionaron dos parcelas por sistema, en las cuales se tomaron muestras de suelo para determinar la concentración de carbono y analizar las características físico-químicas y biológicas relacionadas con el almacenamiento de COT, las cuales, fueron utilizadas para calibrar y evaluar el modelo. A partir de entrevistas, talleres y procesos de observación en campo se definieron los principales manejos realizados sobre el suelo y sus impactos sobre el servicio de almacenamiento de COT. El modelo explicativo se representó en el software para modelado dinámico Stella®, mediante la definición del balance de masas para cada almacenamiento (Mulch, humus y biomasa microbiana). El modelo se corrió a una escala temporal de doce (12) meses. Los datos modelados mostraron que el promedio de acumulación de COT en los suelos bajo los tres sistemas fue de 127, 111 y 110 ton ha⁻¹, para PN, BN y CF, respectivamente. Durante este periodo el COT del suelo evidenció un comportamiento dinámico para los tres usos. En el caso de la PN existieron ganancias de COT en el periodo estudiado. En el BN persiste un comportamiento constante, y en el CF, inicialmente se observó un incremento, retornando a valores cercanos al inicial. Este estudio permitió conocer como los procesos intrínsecos del sistema y las principales actividades antrópogenicas interactúan para proveer en mayor o menor medida el almacenamiento de carbono en los suelos.

Palabras Clave: Dinámica del carbono, servicio ecosistémico, modelo explicativo, manejos del suelo, ecosistemas andinos.

Structured abstract

The study of total organic carbon (TOC) dynamics in soil is of great interest, because its storage and cycling contributes to soil fertility and climate regulation, by reducing CO₂ emissions to the atmosphere. In this study, an explanatory model was developed for the storage dynamics of TOC in soils with three types of vegetation covers: natural pasture (*Holcus lanatus*) (NP), forage crop (FC) (*Pennisetum purpureum*) and natural forest (NF) (dominated by *Quercus humboldtii*). The plots are located in the upper basin of the Piedras river, Popayán, Cauca. Initially, the causal model of carbon storage was defined, from which the main elements of the study were defined. Subsequently, two plots were selected for every system, in which soil samples were taken to determine the carbon concentration and to analyze the physical, chemical and biological characteristics related to the storage of TOCs, which were used to calibrate and evaluate the model. From interviews, workshops and community observation in the area, the main works or activities on the soil and their impacts on the TOC storage service were defined. The explanatory model was rendered in the software for dynamic modelling Stella®, through the definition of the mass balance for each storage (mulch, humus and microbial biomass). The model was run on a twelve (12) months time scale. The modelling data showed that the average COT accumulation in the soils under the three systems was 127, 111 and 110 ton ha⁻¹, for PN, BN and CF, respectively. During this period soil TOC showed a dynamic behavior for all three land usage. In the case of the NP there were gains of TOC in the period studied. In the BN a constant behavior persists, and in the CF, initially an increase was observed, returning to values close to the initial one. This study allowed knowing how the intrinsic processes of the system and the main anthropogenic activities interact to provide to a greater or lesser extent the carbon storage in the soils.

Key words: Carbon dynamics, ecosystem service, carbon model, soil management, Andean ecosystem.

CAPÍTULO 1

Introducción

Abordar el estudio del ciclo del carbono en ecosistemas andinos no solo es un desafío, esto último más por la ausencia de información y las dificultades inherentes a sistemas complejos, de los cuales apenas se están escrutando sus parámetros y condiciones de cambio sobre la ladera andina tropical.

Este trabajo se realiza con la firme intención de develar las condiciones de cómo las comunidades campesinas andinas y los ecosistemas establecen sus interacciones y determinan los procesos que definen los usos del suelo y sus sistemas de producción, situación que se presenta a lo largo de la cordillera de los andes desde Perú hasta Colombia (Pachico, *et al.*, 1994). Aquí las prácticas de manejo de suelos y cultivos han definido la evolución e interacciones entre suelo, agua, planta y atmósfera, lo que ha determinado la producción de las sociedades andinas. Los socio-ecosistemas andinos están cada día más transformados, la ocupación de las laderas tropicales es evidente, pues estas albergan gran parte de la población, al menos en Colombia, y la demanda por agua y alimentos es constante y creciente. Tal condición ha impulsado la intensificación del uso de fertilizantes, pesticidas, determinados tipos de labranza, entre otros factores, para mantener la eficiencia e incrementar la productividad agrícola (Mujuru, *et al.*, 2013). Estas prácticas han originado cambios negativos en las propiedades y procesos que controlan la concentración de carbono en el suelo, afectando su fertilidad y la calidad del agua, incrementando la erosión hídrica y eólica, reduciendo la capacidad de almacenamiento de carbono, lo cual altera la movilización de metales, xenobioticos y producen pérdida de productividad y

sostenibilidad de suelos (López Falcón, 2006). Esta situación se ve amplificada por la pérdida de cobertura del suelo, inducida por los cambios de uso del mismo. McConkey, et al. (2003) y Pabst, et al. (2013), han demostrado que se han perdido cantidades significativas de carbono orgánico total (COT) en forma de dióxido de carbono (CO₂) como resultado de la pérdida de cobertura vegetal, lo que ocasiona su liberación y la alteración del microclima, cuando los bosques se transforman por la introducción de agricultura. La intensificación agrícola destinada a aumentar la producción puede afectar a los componentes y procesos de los ecosistemas, y perturbar muchos de los servicios ecosistémicos (SE) de regulación y apoyo, incluyendo el ciclo de nutrientes, la regulación del clima, la regulación de la calidad y cantidad del agua, la polinización y control de plagas; también puede alterar la diversidad biológica que se sustenta estos SE. El aumento de la producción de alimentos a expensas de los SE puede socavar la sostenibilidad del agroecosistema incluyendo la producción de cultivos (Palm, *et al.*, 2013).

Teniendo en cuenta lo antes planteado, el análisis del comportamiento del suelo en relación a las variables que afectan el almacenamiento de carbono como son los factores climáticos, mineralógicos, propiedades físicas, química, biológicas y prácticas agrícolas específicas (Ryan, *et al.*, 2005), permitirá conocer, entender, analizar y generar alternativas para el manejo de sistemas naturales e intervenidos, mejorando la gestión de los ecosistemas y reduciendo los efectos adversos de prácticas agrícolas deletéreas para el suelo (Sanderson, *et al.*, 2013). De esa forma, se podrían implementar prácticas agrícolas específicas teniendo un enfoque integral (manejo de pastoreo, rotación de cultivos, siembra de especies nativas, manejo de escorrentía, incremento de aportes orgánicos) para favorecer el contenido de carbono e incrementar la fertilidad de suelos; así se evitará la emisión de CO₂ a la atmósfera y se lograría recuperar los atributos y propiedades biológicas del suelo para el posterior establecimiento de especies animales, producción de alimentos y generación de servicios ecosistémicos (SE) relacionados con el suelo, que posibiliten lograr ingresos y comunidades rurales mejor adaptadas (Conant, *et al.*, 2001; Franzluebbers, *et al.*, 2013). Por ello, el estudio del suelo también debe involucrar el análisis de las propiedades, procesos y funciones que realizan las comunidades microbianas involucradas en la prestación de SE (Robinson, *et al.*, 2013b).

Entender la multifuncionalidad de los servicios ecosistémicos (SE) proporcionados de practicar agricultura y conservación de bosques (aprovisionamiento de alimentos, madera y leña, producción de biomasa, suministro de materias primas, ciclo y almacenamiento de carbono, regulación climática, mantenimiento de la biodiversidad (Tamásy, 2013) debe involucrar el conocimiento del contexto socio-cultural en el que se desarrollan. El servicio de almacenamiento de carbono depende de la interacción de las comunidades humanas con el suelo, el agua y las coberturas vegetales, la cual se asocia a su carácter bien sea campesino o indígena, siendo fundamental establecer un diálogo de saberes e intercambios con su narrativa y acciones para compartir esta importante función de los ecosistemas en cuanto a los manejos y la retención de carbono.

En consecuencia, acercarse con una mirada holística e integradora donde se estudien las funciones emergentes de los ecosistemas terrestres (Berkes, *et al.*, 1998) con el enfoque de los socio-ecosistemas (Berkes, *et al.*, 2003; Resilience Alliance, 2010), permite articular los conocimientos y las acciones de las comunidades humanas sobre los sistemas naturales y agropecuarios para poder abordar los procesos de gestión de almacenamiento de carbono vía ciclos biogeoquímicos, reduciendo las emisiones de Dióxido de Carbono - CO₂ (Ramirez, *et al.*, 2008; Wadsworth, 2000).

En este contexto, un aporte sustancial y fundamental de este estudio es explicar la relación entre los procesos internos de almacenamiento de carbono orgánico, la relación con variables climáticas y el manejo específico, comparando entre diferentes usos del suelo de montaña andina, lo cual exigió la elaboración de un modelo de la dinámica de almacenamiento de carbono en suelos para elucidar el proceso de retención de carbono y emisión de CO₂ en condiciones específicas, sugiriendo un manejo adaptativo de las prácticas agrícolas a las comunidades humanas de la zona.

1.1 Pregunta de investigación:

¿Cómo las relaciones entre el uso, comportamiento del suelo y la dinámica de las comunidades pueden explicar el almacenamiento de carbono?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Desarrollar un modelo que explique el almacenamiento de carbono como servicio ecosistémico, asociado con el uso del suelo de las comunidades humanas de la cuenca del río Piedras.

1.2.2 Objetivos específicos

- Cuantificar el contenido de carbono asociado con su dinámica de almacenamiento para diferentes usos del suelo.
- Caracterizar las percepciones, prácticas y técnicas que tienen las comunidades de la cuenca frente a los usos y manejos del suelo, y su relación con el servicio ecosistémico de almacenamiento de carbono.
- Modelar la dinámica de almacenamiento de carbono como servicio ecosistémico en una cuenca Andina.

1.3 Justificación

Todas las funciones ecológicas son inherentes a los procesos de la vida y sus interacciones en los ecosistemas, algunas como la productividad primaria, los ciclos biogeoquímicos, la descomposición de materia orgánica, la formación de suelos, los flujos de nutrientes y energía son irremplazables y fundamentales para los seres vivos y los sistemas en la naturaleza. Todas estas funciones propias de los ecosistemas, son vitales, mantienen la base biofísica de la vida en la tierra y

constituyen las condiciones previas para las actividades humanas, que utilizan sus transformaciones y productos, los cuales se denominan Servicios Ecosistémicos (SE) (Groot, *et al.*, 2002; MEA, 2003; Zhongyuan, *et al.*, 2011).

Los SE han sido promovidos como un medio para evaluar los beneficios derivados de los recursos naturales hacia los humanos, argumentándose inicialmente, una mayor protección de la biodiversidad (Groot, *et al.*, 2002; MEA, 2003 ; Wallace, 2007), pero la visión, asociada al valor de uso o al beneficio recibido, no necesariamente ha respondido al valor intrínseco que poseen los procesos y las funciones ecológicas del ecosistema, ocultándose así la labor realizada por el ecosistema y los factores abióticos que hacen posible que existan los denominados SE (Peterson, *et al.*, 2010).

El servicio ecosistémico de almacenamiento de carbono ha cobrado interés en la actualidad no solo por los acuerdos destinados a reducir y equilibrar la concentración de Gases de Efecto Invernadero (GEI) suscritos en el Protocolo de Kioto, sino porque éste es la base de temáticas asociadas con la seguridad alimentaria, la mitigación y la adaptación al cambio climático, desafíos que demandan la comprensión integral del sistema socio-ecológico (McBean, 2011). Numerosos estudios sobre almacenamiento de carbono se han centrado en la relación con el cambio climático, la valoración económica y la construcción de esquemas de pagos por sumideros de carbono (Daily, *et al.*, 2000; Shaw, *et al.*, 2009), primando en ellos, la visión económica como fundamento para valorar y evaluar los servicios derivados de la disponibilidad que generan los recursos naturales existentes en un territorio, y no haciendo visible sus interacciones y funciones inherentes a la vida, lo cual se busca a través de la concepción de los SE con una visión sistémica y compleja.

En definitiva, la generación de información científica rigurosa que nos permita llenar vacíos de información y reconocer el SE de almacenamiento de Carbono presente en nuestros propios sistemas, examinados por la función ecológica e interacciones con el sistema socio-cultural (Ashwani, 2008), permitirá analizar y predecir de qué manera los cambios ambientales pueden modificar las dinámicas naturales de los ecosistemas y afectar a las personas inmersas en ellos.

Es por ello, que abordar esta temática desde las ciencias ambientales, estudiando el SE con enfoque sistémico, permite consolidar la comprensión de las

interacciones entre las funciones ecológicas que proveen el servicio, la dinámica de las comunidades humanas y sus interacciones en el sistema natural; igualmente con las condiciones climáticas, enfatizando y valorando la sinergia con otras funciones y servicios ecosistémicos proveídos por el suelo, tales como el mantenimiento de la capacidad agrológica, la calidad del agua, la productividad primaria, las cuales son funciones inherentes a la vida y por ende para proporcionar SE. Es esta información determinante para entender la dinámica de las comunidades humanas y sus interacciones en el sistema natural, para fomentar las relaciones culturales sostenibles con los ecosistemas, en la medida de la gestión adecuada, donde se regule la interacción con los sistemas socioculturales que puedan alterar el funcionamiento natural del sistema. Esto con la finalidad de promover prácticas agrícolas de bajo impacto para el ecosistema, conduciendo a crear conciencia ecológica, y contribuyendo a una mayor seguridad alimentaria, sociocultural, y ecológica.

1.4 Estructuración de la tesis

La tesis se ha estructurado en seis partes: **un primer capítulo** que introduce en el contexto, problemática, alcance y justificación del estudio del servicio ecosistémico de almacenamiento de carbono. **Un segundo capítulo** que presenta estado del arte y contextualización. **El tercer capítulo**, presenta el área de estudio, metodología y análisis de datos. En el **cuarto capítulo** se desarrolla el contexto socioeconómico de la comunidad humana en relación a los manejos del suelo, el **Quinto Capítulo** presenta el análisis de las variables fisicoquímicas, biológicas y de dinámica de carbono, medidas experimentalmente en los tres usos del suelo durante 12 meses. **El sexto Capítulo**. Se refiere al desarrollo de los modelos de almacenamiento de carbono en suelo, junto con el análisis de la dinámica de carbono y los manejos realizados sobre el suelo. Finalmente se elaboran las conclusiones y recomendaciones.

Capítulo 2

Marco referencial: estado del arte

En la historia de la humanidad, la naturaleza y el valor de los sistemas que mantienen la vida en la Tierra han sido fundamentales para el desarrollo de las civilizaciones. De hecho muchos pueblos que no tomaron en cuenta dicha relación se vieron abocados a su desaparición o migración (Roy-Ladurie, 1990; Serrano, *et al.*, 1999) y la enseñanza a las generaciones futuras no fue evidente. En el presente, las sociedades humanas están obligadas a no ignorar la alteración o pérdida de estos sistemas naturales, valorando su importancia. Por ejemplo, la deforestación reveló tardíamente la función crítica que cumplen los bosques como reguladores del ciclo del agua mitigando las inundaciones, las sequías, las fuerzas erosivas del viento, la lluvia y la turbidez de las aguas; De igual manera, la sociedad junto con la intensificación de procesos productivos e industrialización están contribuyendo a la degradación de suelos, pérdida de especies, incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero y alteración del clima, en consecuencia se está afectando la producción de alimentos, la regulación hídrica, la purificación del aire, la polinización, y los mecanismos reguladores de la naturaleza.

Cuando ya no se dispone de las funciones y procesos naturales, se afectan las comunidades humanas, muchas de las cuales pueden verse abocadas a la pérdida de identidad y patrones culturales, aunque milenariamente hubiesen convivido con esos entornos. En la actualidad los impactos de las actividades

humanas ponen en evidencia la pérdida de este conjunto de beneficios y sus consecuencias para la sociedad.

Hoy se puede afirmar rotundamente que todos los bienes y servicios de los que gozan las sociedades humanas dependen totalmente de transformaciones de materiales y energía que solo pueden ser obtenidas de la naturaleza; por ello los ecosistemas y su mantenimiento son la base de nuestra subsistencia, así como del desarrollo económico y social del que depende nuestro bienestar, por esto se puede afirmar que los servicios que recibimos de la naturaleza son beneficios que los ecosistemas nos otorgan.

Con este contexto nos acercamos a conocer y apropiarnos el concepto de servicios ecosistémicos, siendo necesario abordar para esta tesis los servicios relacionados con el suelo, el carbono orgánico y sus interacciones. Esto como un acercamiento que nos permita vislumbrar como y de qué manera se realiza la regulación del carbono en suelos Andinos de la ladera tropical.

2.1 Análisis teórico

2.1.1 Servicios ecosistémicos

Todas las funciones ecológicas son inherentes a procesos biogeoquímicos y ecológicos del ecosistema, algunas como la productividad primaria, los ciclos de nutrientes, la descomposición de materia orgánica, la formación de suelos, los flujos de nutrientes y energía que mantienen la vida. Todas estas funciones propias de los ecosistemas son soporte vital, mantienen la base biofísica de la vida en la tierra y constituyen las condiciones previas para las actividades humanas (MEA, 2003 ; Zhongyuan & Hua, 2011).

Las funciones ecológicas a su vez proporcionan uno o varios Servicios Ecosistémicos, que dependen inicialmente, de la capacidad de los procesos naturales de mantener y proveer bienes y servicios que permiten satisfacer las necesidades humanas directa o indirectamente (Groot, *et al.*, 2002). Se denominan Servicios Ecosistémicos (SE) a los “beneficios que las personas obtienen de los ecosistemas” (MEA, 2005), o a los aspectos que se utilizan activa o pasivamente para producir bienestar humano (Fisher, *et al.*, 2009). Éstos pueden clasificarse en **servicios de aprovisionamiento**, como alimentos y agua;

de regulación, como control de inundaciones, de enfermedades y del clima, **culturales**, como beneficios espirituales, recreativos y culturales; y **de soporte**, como los ciclos de nutrientes, que hacen posible la vida en la tierra (MEA, 2003 ; Wallace, 2007).

Los SE han sido promovidos como una herramienta para evaluar los beneficios derivados de los recursos naturales hacia los humanos, argumentándose inicialmente una mayor protección de la biodiversidad (Groot, *et al.*, 2002). Pero la visión asociada al valor de uso o al beneficio final recibido no necesariamente ha respondido al valor intrínseco que poseen los procesos y las funciones ecológicas del ecosistema, ocultándose la labor realizada por el ecosistema y los factores abióticos que hacen posible que existan los denominados SE (Peterson, *et al.*, 2010).

Los procesos y funciones ecosistémicos siempre han existido en la tierra, y la vida es el resultado de la interacción entre estos y la biosfera, de allí que tengan la capacidad de proporcionar beneficios al hombre o SE denominados por el intelecto humano. Procesos que son perturbados por las políticas relacionadas con el crecimiento económico, los cambios demográficos, y las prácticas propias de la humanidad, que han incrementado la demanda de recursos, afectando la relación entre la oferta y la demanda de los mismos.

De esta forma, la degradación de los ecosistemas compromete progresivamente la sustentabilidad ambiental y en consecuencia el bienestar humano que hace más vulnerables a las personas, las comunidades y las naciones que dependen de ellos. Así, la apropiación de la naturaleza y sus SE, su valor de uso, la mercantilización, la creación de esquemas de comercio de emisiones y los Pagos por Servicios Ambientales (PSA), como herramientas para facilitar la conservación de recursos naturales «escasos» conllevan a que los ecosistemas, ya no sean vistos como dones gratuitos de carácter público (Gómez-Baggethun, 2011). Se han incorporado los procesos ecosistémicos a mercados que generalmente son incapaces de enfrentar temas de equidad intra e intergeneracional relacionados con el manejo de recursos naturales para las actuales y futuras generaciones; mercados que no siempre garantizan la conservación de ecosistemas y sus SE (Evaluación de Ecosistemas del Milenio, 2003), es decir, la lógica neoliberal del

mercado no protege adecuadamente el funcionamiento de procesos ni la capacidad de resiliencia (Peterson, *et al.*, 2010).

La visión de nuestros ecosistemas como medios “fuente material de bienes para producción y consumo, solo reitera la visión reduccionista y utilitarista de la economía neo-clásica” (Chiesura, *et al.*, 2003) y subyace en problemas relacionados con el individualismo, con el “desencantamiento” del mundo, con el centrarse en el yo, y con la pérdida de significado real de los elementos que nos rodean, la simple visión de nuestros ecosistemas como materias primas o instrumentos potenciales para nuestros proyectos, en busca de la mejor relación costo-rendimiento, acompañada de la pérdida de sentido, y de interés por los demás, o por la sociedad en su conjunto (Taylor, 1991).

De esta forma, las distintas cosmovisiones sobre el ambiente influyen en las diferentes prácticas y actitudes, donde algunas lo toman como espacios y escenarios de vida; y otras como simple medio económico o sistema de recursos naturales (Quintana, 2008), unos desde el “pensamiento y la cultura de grupos étnicos, y otras desde la modernidad capitalista dominante” (Escobar, 2005). En este sentido, juegan un papel importante la cosmovisión y el pensamiento que tienen los pueblos ancestrales sobre el ambiente, su relación con la naturaleza y su actitud, en la que consideran que la naturaleza y el hombre hacen parte del mismo sistema, considerando la continuidad y características semejantes, recalcando la importancia del respeto al ambiente, el que se traduce en el respeto a sí mismos y a las generaciones futuras (Katz, *et al.*, 2008), valores que podrían ser claves en el proceso de garantizar el uso sostenible de los ecosistemas.

Es preciso entonces rescatar el valor real que juegan los procesos de los ecosistemas para nuestras vidas, para nuestra viabilidad en el planeta, por ello, es importante reconocer su valor intrínseco, necesario para la toma de decisiones, no solo basándose en el valor utilitarista que muchas veces no describe la importancia de las funciones y procesos que los mantienen. Tal es el caso de los servicios regulatorios, polinización, biodiversidad (como los alimentos y recursos genéticos) y culturales, para los cuales en ocasiones no existe un mercado (Singh, 2002), porque tan solo se valora el producto final, que es medido por el impacto económico (Rodríguez, *et al.*, 2006). De esta forma, se hace necesario el reconocimiento de los SE, no únicamente por la eficiencia o el análisis «costo-beneficio», que busca su mayor rendimiento con una asignación monetaria, es

preciso determinarlos por otros criterios; que nos hagan más sensibles a las necesidades del medio ambiente, hasta el punto de prevenir desastres producto de su explotación. Entendiendo además, que el pago por daños perjudiciales al ecosistema, y la implementación de tecnología, no es la solución total a los problemas y al deterioro, se requiere algo muy diferente para la valoración y sostenibilidad de los ecosistemas (Taylor, 1991). Son necesarios principios de ética y estética en nuestro actuar y en la forma de relacionarnos, se necesita una visión sistémica y quizá más que una ética ambiental, se requiere una ética de la naturaleza o una ética de la vida lo cual nos plantea una mirada como la propuesta por el filósofo Hans Jonas cuando nos habla del “bien-en-sí” que constituye la vida natural y humana, que supera las visiones del tecno-centrismo utilitarista, esclavo del capital (Burgi Burgi, 2015).

Servicios ecosistémicos del suelo

El suelo es el fundamento de todos los ecosistemas terrestres, de aprovisionamiento de productos agrícolas y de maderas, además de ser el medio estructural para el apoyo a la biosfera terrestre y la infraestructura humana. Los servicios prestados por el suelo están vinculados a funciones clave como las siguientes:

- Producción de biomasa.
- Almacenamiento de carbono y su ciclo.
- Almacenamiento, filtración y transformación de nutrientes (Nitrógeno, Fosforo, Azufre, etc.)
- Provisión de hábitat para las especies.
- Provisión del entorno físico y cultural para las personas y sus actividades.
- Suministro de materias primas.

Estas funciones se llevan a cabo en diferentes niveles y están determinadas por la posición geográfica y el relieve que establecen las características internas del suelo como son la textura, el contenido de materia orgánica, el pH, la capacidad

de intercambio catiónico, y porosidad; y externas como como el clima, la hidrología, la biología, así como el uso y gestión del suelo (Tóth, *et al.*, 2007).

Las condiciones del suelo y el tipo determinan también su capacidad para funcionar y proporcionar servicios. La degradación puede ser reflejada por la disminución de la fertilidad del suelo y la materia orgánica, la pérdida de la biodiversidad y capacidad de retención de agua, nutrientes y gases, así como la aptitud de degradar contaminantes (Tóth, *et al.*, 2007). La degradación de los suelos reduce la habilidad de proveer servicios ecosistémicos (Finvers, 2008). De ahí que se tomen medidas necesarias que permitan mantener la provisión de los mismos.

El estudio de los suelos como proveedor de servicios ecosistémicos ha ganado más atracción que la ciencia del suelo, probablemente porque hace énfasis al servicio final de la provisión de alimentos. Sin embargo, en este planteamiento no está reconociendo la importancia de las propiedades, procesos y funciones de los suelos, y se ignora que la provisión de los beneficios finales dependen en gran medida de la biodiversidad del suelo (Robinson, *et al.*, 2013a). Tanto así que a pesar de conocerse que el suelo contiene al menos un tercio de todos los organismos vivos en el planeta y que contribuyen a una amplia gama de servicios esenciales para el funcionamiento sostenible de todos los ecosistemas (Breure, *et al.*, 2012), solo alrededor del 1% de los microorganismos del suelo han sido identificados en comparación con el 80% de las plantas (Jeffery, *et al.*, 2010).

La reciente Evaluación de Ecosistema Británica Nacional (NEA, 2011), presentó un marco conceptual que amplía el del MEA (2005). El marco NEA tiene la formación del suelo y la producción primaria como punto de partida sobre el que actúan procesos como el ciclo de nutrientes para dar soporte a la prestación de servicios de los ecosistemas finales, que suministran los bienes que son valorados.

Robinson, *et al.*, (2013b) proponen que el enfoque de servicio ecosistémico final unido al de capital natural (reservas de suelo, stocks-flujos emergentes) sea el marco adecuado para el desarrollo sostenible, porque los suelos tienen la función vital de proporcionar servicios ecosistémicos de apoyo, resaltando que los bienes

y servicios finales se derivan de una cadena de suministro de los ecosistemas, que se basa en la estructura ecofisiológica. Un enfoque de capital natural del suelo y servicios de los ecosistemas permite la contribución de los suelos para el bienestar humano y ser reconocidos en la toma de decisiones de la sociedad. Tomando en cuenta esta acotación el enfoque expresado va más allá de los indicadores de desempeño de la calidad del suelo, y la evaluación cualitativa de la influencia del uso del suelo sobre el entorno, proporcionando una evaluación comprensiva y más holística de las compensaciones entre los resultados ambientales, económicos, sociales del uso actual de la tierra, de los cambios de uso del suelo y de los impactos generados por el desarrollo, permitiendo de esta forma tener una visión más allá de la sola provisión de alimentos (Breure, *et al.*, 2012).

2.1.2 Carbono Orgánico y su función en los suelos

Los suelos contienen más carbono que la suma existente en la vegetación y la atmósfera (Swift, 2001). El carbono orgánico (CO) ocupa el 71% del CO terrestre encontrado en los suelos (Lal, 2010). Se localiza en la capa orgánica del suelo aproximadamente en los primeros 0.30 m de profundidad, y ocupa el 90% de este compartimento (residuos de plantas, material descompuesto parcialmente y humus), aproximadamente el 1% es carbono soluble, y el 9% es la biomasa microbiana, fuente de reserva de nutrientes (N, P) (Fuentes, *et al.*, 2011). Las existencias de carbono orgánico presente en los suelos naturales representan un balance dinámico entre la absorción de material vegetal muerto y la pérdida por descomposición (Respiración).

El carbono orgánico del suelo es el principal constituyente de la materia orgánica, y su totalidad se puede reunir fundamentalmente en dos grupos. El primero está formado por la descomposición o metabolismo y re-síntesis de restos orgánicos de aquellos materiales identificables como las partes total o parcialmente alteradas de la biomasa (plantas, animales y microorganismos), formados por proteínas, aminoácidos, hidratos de carbono simples y compuestos, resinas, grasas, ligninas y otros, las que son fuentes de nutrientes para las plantas y los organismos del

suelo, cuando se descomponen por medio de la mineralización. El proceso de utilización del sustrato mediante reacciones físicas y biológicas libera dióxido de carbono (CO₂), óxido nitroso (N₂O) y metano (CH₄) hacia la atmósfera. El segundo grupo se denomina sustancias húmicas, es la mayor parte de la materia orgánica edáfica, un producto microbiológico que se encuentra asociado a la materia mineral fina del suelo; su formación se realiza por procesos complejos de transformación de los restos orgánicos (Landsberg, *et al.*, 2011), donde a partir de la humificación se genera una mezcla de sustancias que tiene alta resistencia al posterior ataque microbiano.

El carbono del suelo es producto del almacenamiento de muchos años, los cambios drásticos en la estructura del suelo pueden causar alteraciones en sus concentraciones (Ryan & Law, 2005). En consecuencia, cualquier pérdida neta de carbono de los suelos aumentará la concentración de CO₂ en la atmósfera y en los cuerpos de agua (Kutsch, *et al.*, 2010). La acumulación y ciclado de materia orgánica del suelo es el principal factor de fertilidad y del funcionamiento ecosistémico (Gómez, *et al.*, 2001). La dinámica del Carbono es importante para la sostenibilidad de los sistemas productivos y al mismo tiempo contribuye al ciclo del carbono (Bremer, *et al.*, 2005).

La materia orgánica del suelo es un indicador clave de la calidad del mismo, tanto en sus funciones agrícolas (producción y economía) como en las ambientales entre ellas captura de carbono. La materia orgánica del suelo (MOS) y la actividad biológica que esta genera, tienen gran influencia sobre las propiedades físicas y químicas de los suelos; químicamente, la MOS se compone de una fracción de materia orgánica libre y materia orgánica humificada, siendo esta última el componente más importante debido a sus propiedades. La MOS es un material coloidal, de composición indefinida, oscuro, con alta superficie específica y alta actividad química (Bendeck, 2003). La agregación y la estabilidad de la estructura del suelo aumentan con el contenido de materia orgánica, ésta a su vez, incrementa la tasa de infiltración y la capacidad de agua disponible en el suelo, así como la resistencia contra la erosión hídrica y eólica. La materia orgánica del suelo también mejora la dinámica y la biodisponibilidad de los principales nutrientes de las plantas, presentando la posibilidad del secuestro de carbono, lo cual contribuirá a restaurar la calidad de los suelos degradados (Gómez, *et al.*,

2001). Finalmente, el contenido de materia orgánica del suelo es por lo general más bajo donde la degradación es más severa.

Dinámica de Carbono orgánico el suelo

La mayoría de la materia orgánica (MO) que entra al suelo se origina a partir de partes de plantas, principalmente se deriva de ramas, corteza, hojas, flores, frutos, musgos, líquenes, hongos, raíces, hifas y aportes de heces y animales muertos. Otras fuentes de MOS son la deposición seca y humedad de la superficie del suelo, y la aplicación de fertilizantes y estiércol (Kutsch, *et al.*, 2010). En condiciones aeróbicas la mineralización de la MO (Materia orgánica fresca) produce oxianiones de dióxido de carbono y elementos esenciales para la nutrición de las plantas, los cuales son absorbidos por vía radical. La MO también puede dar origen a la formación de humus (humificación), que a su vez también puede ser degradado lentamente (mineralización secundaria) por intermedio del sistema microbiológico que contribuyó a su génesis. En medios anaeróbicos el proceso puede conducir a la formación de compuestos ricos en carbono (petróleo, hulla, grafito, etc) (Rosell, s,f). Los proceso de mineralización y humificación están regulados principalmente por la relación C:N.

Transformación de la materia orgánica en el suelo

En la interacción suelo-planta, la dinámica de las transformaciones biológicas de las fracciones orgánicas tiende a ser cíclica y la acción de los microorganismos del suelo tiene una importancia fundamental. Estos constituyen el componente más activo del suelo, ya que intervienen en los procesos de mineralización de MO, poniendo a disposición de otros microorganismos y de las plantas los nutrientes contenidos (Bartsev, *et al.*, 2015; Fuentes & Varnero, 2011), además contribuyen a la síntesis de sustancias complejas (humus).

Para que ocurran estas transformaciones se requiere energía, la que es obtenida de la radiación solar, mediante la fotosíntesis, proceso que produce una gran cantidad de sustancias carbonadas que luego retornan al suelo como aportes de residuos orgánicos frescos, donde se causan dos situaciones: La primera, la descomposición biológica o mineralización de las fracciones orgánicas lábiles, y b)

la humificación o síntesis de complejos orgánicos, denominados humus o MO estable. El balance que se produce entre su mineralización y humificación está determinado por los coeficientes de humificación o isohúmico y de las tasas de mineralización, lo cual permite establecer la dinámica de la MO en los suelos. También ocurre la inmovilización de los elementos minerales cuando estos se incorporan a las estructuras microbianas. Esto sucede porque los microorganismos requieren de una fuente de nitrógeno para la utilización de los compuestos carbonados, que generalmente obtienen a partir de la degradación de proteínas, péptidos y aminoácidos, los cuales son de fácil descomposición, por lo que son los primeros en degradarse; en consecuencia la proporción C:N del material que se va a degradar es un indicador que determina la facilidad con que éste es mineralizado (Fernández, *et al.*, 2010). Materiales con la proporción 10:1 y 15:1 son atacados más fácilmente por bacterias, mientras que los que tienen proporción 20:1 son atacados por hongos (Perdomo, *et al.*, 1998). Relaciones C:N óptimas determinan el equilibrio entre los procesos de mineralización y humificación.

La mineralización primaria ocurre relativamente rápido y concluye con la humificación, o sea, con la formación del humus en pocos años; esto es, 1 a 2 años en climas húmedos, templados y suelos bien aireados, 2 a 3 años en climas templados y semiáridos. El humus a su vez es susceptible de oxidarse al aire, es descompuesto lentamente por los microorganismos mediante la mineralización secundaria. Esta degradación se produce con una media del orden de 0,5 a 2,0% del total en el término de un año, acorde a las características del medio que lo originó y las condiciones del clima. Ambos tipos de mineralización poseen características comunes, como la liberación de nutrientes fácilmente absorbibles por las raíces de las plantas; sin embargo, las tasas de mineralización secundaria son menores que las de mineralización primaria. La mineralización es indispensable no solo para restituir el C mineral (CO₂) a la atmósfera, sino también para devolver al suelo elementos que le han sido extraídos (NO₂, NO₃, NH₃, NH₄⁺, H₂PO₄⁻, SO₄⁻, K⁺, Mg²⁺) para la biosíntesis de moléculas orgánicas. De esta forma, el ciclo del C está estrechamente ligado al ciclo del nitrógeno, fósforo y azufre (Fuentes & Varnero, 2011).

2.1.3 Rol de la Respiración en los suelos

La respiración del suelo, o emisión de CO₂ es uno de los más importantes componentes del ciclo del carbono, es la suma de los flujos originados de la necromasa, materia orgánica y raíces, está controlada por la actividad microbiana del suelo y factores ambientales como la temperatura, el contenido de agua y la radiación fotosintéticamente activa (PAR) (Luo, *et al.*, 2006a). La respiración total es la suma entre el CO₂ emitido por las plantas (autotrófica-Ra) que puede darse sobre y bajo el suelo, y el CO₂ producido por la actividad microbiana (heterotrófica -Rh) durante la descomposición del material orgánico. La tasa de respiración medida sobre la superficie del suelo es la suma de la respiración de las raíces y microbios (Luo, *et al.*, 2006b). Se ha estimado que la contribución de la Ra esta alrededor de 48-69% de la respiración total, y que existen diferencias entre las mediciones con y sin necromasa sobre el suelo, aportando en promedio 37% a la respiración.

La respiración varía en diferente amplitud y no es constante durante las 24 horas del día. Se ha reportado que es mayor el aporte de la respiración en la tarde que en la noche durante el ciclo diurno, y puede ser explicado más por la correlación de la temperatura de la superficie que por la del suelo. En este sentido, se han reportado estudios en bosque templado, boreal, neotropical, subalpino, y en menor medida en sabanas y cultivos (Luo, *et al.*, 2006d).

En resumen, la respiración se considera variable y dependiente del tiempo o clima, debido a que los factores climáticos y de humedad del suelo varían a lo largo del día y entre meses. Normalmente se espera que exista correlación de la respiración con la temperatura del suelo, sin embargo en muchos casos no se correlaciona, probablemente debido a que otros parámetros abióticos como la humedad del suelo y PAR tienen un impacto significativo sobre la respiración de las raíces (Liu, *et al.*, 2006).

La respiración del suelo está íntimamente relacionada con la actividad descomponedora de los microorganismos, los cuales dependen de la humedad del suelo, su densidad aparente y su fracción mineral. La descomposición promueve el ciclo de nutrientes y mejora la calidad del suelo, mientras que la cantidad y calidad de mantillo juega un importante rol en el almacenamiento de carbono y ciclo de nutrientes (Sierra, *et al.*, 2003). Se ha comprobado que el metabolismo

aeróbico de los organismos decrece como el espacio de los poros cuando se llenan de agua y llegan al punto de saturación (Franzluebbers, 1999); la curva de la relación entre la humedad del suelo y la actividad microbiana puede ser descrita por una campana con los valores mínimos en ambos extremos y un máximo contenido de humedad en el centro, donde el equilibrio de agua y la disponibilidad de oxígeno es óptima (Moyano, *et al.*, 2013). Es por ello que la relación entre la respiración heterotrófica y humedad del suelo emerge de las interacciones físicas (por ejemplo, la difusión), fisiológicas (osmorregulación), y de procesos bioquímicos (dinámica enzimática). Respecto a esto Manzoni, *et al.*, (2012) encontraron que en el caso de la necromasa, la descomposición es suspendida a potenciales hídricos más negativos que en suelos minerales, lo que indica que los descomponedores se ven afectados menos por la difusión que por el estrés osmótico o desactivación enzimática (Moyano, *et al.*, 2013).

Adicionalmente, se ha encontrado que la respiración es mayor en ecosistemas maduros y se refleja en la producción neta; mientras en los ecosistemas en producción la tasa de producción primaria, la fotosíntesis total (bruta) llamada P, supera a la respiración (R), de modo que la relación P/R es mayor a 1. En el caso de un ecosistema que se encuentra en un estado maduro o que ha alcanzado su clímax, la energía fijada tiende a equilibrarse con el coste energético de mantenimiento, con ciclos más lentos y con una relación P/R que tiende a 1 (Odum, 1972), denominado también equilibrio dinámico.

Finalmente, el incremento de las temperaturas medias como efecto de los procesos de cambio climático potencia la actividad de los microorganismos del suelo y sus enzimas, lo cual ayuda a la degradación de la materia orgánica (Kotroczo, *et al.*, 2014). De igual forma, los procesos de degradación incrementan la temperatura y en consecuencia la respiración del suelo, lo que resulta en la disminución del contenido de materia orgánica y promueve el deterioro del suelo (Kuzyakov, 2006).

2.2 Estado del arte

2.2.1 Contexto Nacional e internacional de gestión de carbono

En el momento la temática del carbono (almacenamiento, menos emisiones) es objeto de las políticas nacionales colombianas, por lo cual a partir de 1994 se ratificó en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC) para adelantar acciones frente al cambio climático. Seguidamente en el año 2000 se aprobó el protocolo de Kioto. En el 2001 el Ministerio de Medio Ambiente Vivienda y desarrollo Territorial (MAVDT) formuló la estrategia nacional para la implementación de MDL y el Conpes 3234; en ese mismo año, el IDEAM (2001) publicó la primera comunicación Nacional para el cambio climático, lineamientos de políticas para el cambio climático, que expuso el inventario nacional de GEI para los años 1990 y 1994. En el 2010 se publicó la Segunda Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, en donde se expuso el inventario nacional de fuentes y sumideros de GEI para los años 2000 y 2004. Por otra parte, es importante mencionar que desde 2011, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y el Departamento Nacional de Planeación formularon el programa Estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en Carbono (ECDBC) como un programa de corto, mediano y largo plazo, cuyo objetivo es desligar el aumento de las emisiones de gases efecto invernadero (GEI) del crecimiento económico nacional, dentro de esta estrategia se encuentran programas, acciones ó regulaciones denominadas Acciones Nacionalmente Apropiadas (NAMAS) para reducir las emisiones de Gases Efecto Invernadero y pueden ser aplicadas como Planes Sectoriales de Mitigación (PAS). La estrategia es conducida por grupos de trabajo en el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), el Departamento Nacional de Planeación (DNP), y Ministerios Sectoriales de Colombia.

En el marco de políticas y convenios nacionales e internacionales, se han desarrollado protocolos para la caracterización del ciclo del carbono en ecosistemas de alta montaña (CIAT, 2006; Hanson, *et al.*, 2000), siendo temática de interés de ONGs, gobiernos nacionales y regionales interesados en implementar proyectos de pagos por servicios ambientales basados en carbono para promover el desarrollo sostenible de los bosques (Honorio-C., *et al.*, 2010), proceso que debería ser evaluado críticamente en el entorno de la política

Colombiana, pues esto no responde a los intereses del país ni de las localidades. Molina, et al., (1983) evaluaron el establecimiento de prioridades y la planificación de carbono y gestión de recursos hídricos en la zona amazónica de Colombia.

Fonseca et al., (2012) y Sus, et al.,(2010), realizaron estimaciones precisas y confiables de biomasa vegetal (Carbono), basados en datos específicos, de sitio y especies, desarrollando ecuaciones alométricas; al igual que el modelo CREFT para estimación de biomasa y captura de carbono en especies tropicales. Riaño, et al. (2005) y Alvarez, et al. (2012) analizaron los datos de la biomasa sobre el suelo en árboles en Colombia. Otros midieron la asimilación de CO₂ mediante modelos de fotosíntesis en Colombia (Gomez, et al., 2001). Los anteriores trabajo son análisis de carbono en la vegetación sin abordar una mirada sistémica del carbono, no se establece la relación planta-suelo. (Hansen, et al., 1991).

Carvajal et al., (2009) y Díaz (2008) evaluaron la distribución del Carbono orgánico en el suelo. Sin embargo, no tienen en cuenta el componente sistémico. Lavelle, et al., (2014) evaluaron la regulación climática midiendo emisiones GEI, y almacenamiento de carbono en vegetación y suelo en ecosistema de sabana. Whitaker, et al., (2014) estudiaron la influencia de la elevación en las propiedades biológicas y abióticas del suelo en ecosistemas de suelos forestales de los andes, y como afectan a los procesos de ciclado la variación en substratos mediante la respiración heterotrófica. Bahr, et al. (2014) investigaron el carbono orgánico del suelo y su balance, evaluado temporalmente la relación con las actividades de manejo. Amézquita, et al (2006) evaluaron la capacidad de captura de carbono en diferentes sistemas pastoriles tropicales para mitigación y adaptación de áreas vulnerables al cambio climático y mediciones del impacto de la agricultura sobre el almacenamiento de carbono y cambios de uso del suelo. Jagadamma y Lal (2010) estudiaron el carbono orgánico del suelo en diferentes fracciones de materia orgánica para suelos de cultivo, resultando mayor almacenamiento de carbono en periodos de no labranza y en la superficie del suelo.

También se destacan varios estudios de fijación y almacenamiento de carbono en sistemas agro-forestales algunos con café Arabigo y Cacao en Ecuador (Corral, et al., 2006), y en plantaciones de teca en Ecuador, Costa Rica y Brasil (Jiménez, et al., 2009). Lettens, et al. (2005) investigaron suelos de bosque durante el periodo de 1990-2000 que almacenaron en promedio 14.8 y 15.5 kg.m⁻² de carbono,

resultados comparables con los de praderas, pero significativamente superiores a los de cultivos.

La mayoría de las investigaciones antes mencionadas son mediciones de línea base de carbono en diferentes componentes terrestres que relacionan de alguna forma las condiciones biofísicas del sistema. No obstante, no todas comprenden las interrelaciones entre las emisiones de CO₂, calidad, capacidad de almacenamiento de carbono en suelos, actividad microbiana, clima y relación con el contexto sociocultural de las zonas; gran parte de las investigaciones encontradas se han realizado en Asia, Europa, USA y Brasil; para Suramérica, especialmente para la zona andina y Colombia aún existe poco volumen de publicaciones en esta temática y menor en la modelación de la dinámica de almacenamiento de carbono orgánico del suelo.

2.2.2 Modelos de carbono

En la actualidad el potencial de los suelos para secuestrar carbono está dirigiendo los estudios a investigar la dinámica del carbono orgánico, y la influencia que diferentes factores como el clima, el tipo de residuo, la estructura, ejercen sobre su almacenamiento. De esta forma, se pueden citar varios estudios que trabajan la modelación de la dinámica de almacenamiento de carbono, parte de ellos, está orientada a la identificación de un proceso o un compartimento (pool), y están basados en la transferencia de materia orgánica en el suelo y sus perfiles (Smith, *et al.*, 1997), pueden tener un grado variable de complejidad, desde el caso más simple sin compartimentos (teniendo en cuenta la degradación como un continuo) a los modelos más refinados, de múltiples compartimentos de materia orgánica con composición química similar. Los modelos fueron analizados para la construcción de la dinámica de carbono en suelos de ladera andina, objeto de este estudio (Tabla 1): Los modelos RothC, CANDY, DNDC, CENTURY, DAISY y NCSOIL han sido evaluados por GCTE SOMNET (Global Change and Terrestrial Ecosystems Soil Organic Matter Network) mediante conjuntos de datos de diferentes usos de suelo, tratamientos y variables climáticas (Smith, *et al.*, 1997).

Adicional a los modelos (Tabla 1), existen otros basados en geo-estadística para expresar la distribución de carbono total en diferentes profundidades del suelo

(Vasques, *et al.*, 2010), y para representar dinámicas globales entre planta-suelo (Stuart Chapin III, *et al.*, 2009). Suzuki y Ichii (2010), y XingChang *et al.* (2008) modelaron con Eddy Covariance (EC); La técnica de EC se está implementando y calibrando su metodología para mediciones de intercambio gaseoso y energético entre la atmósfera y ecosistemas en condiciones de ladera andina ecuatorial Castaño, *et al.* (2015). Laterra, *et al.* (2012) crearon un índice para estimar la función ecosistémica que cumplen los suelos en almacenar carbono orgánico propuesto por el IPCC donde se multiplica el contenido de carbono orgánico del suelo y varios factores de corrección, se calcula mediante ArcToolboxes de ArcGis.

Tabla 1. Modelos de carbono

Modelo	Característica	Autor
RothC	Asume cinco compartimentos, y simula la transferencia de carbono entre ellos asumiendo procesos de descomposición de primer orden. Nitrógeno y Carbono no son interconectados.	(Jenkinson, <i>et al.</i> , 1990)
CENTURY	Modelo general de los ciclos de nutrientes planta-suelo que se ha utilizado para simular la dinámica del carbono y nutrientes para los diferentes tipos de ecosistemas que incluyen pastizales, tierras agrícolas, bosques y sabanas.	(Parton, <i>et al.</i> , 1994).p
DAISY	Simula las tendencias en los niveles totales de carbono en el suelo en sitios de cultivo	(Hansen, <i>et al.</i> , 1991)
CANDY	Modela la dinámica del carbono y el nitrógeno principalmente para suelos arables	(Franko, <i>et al.</i> , 1997)
NC SOIL	Simula el flujo de Carbono y Nitrógeno a través de microbios del suelo y componentes orgánicos	(Molina, <i>et al.</i> , 1983)
DNDC	Simula el ciclo de carbono y nitrógeno en agroecosistemas	(Li, <i>et al.</i> , 1994)
SOILM	Simula la dinámica del carbono y nitrógeno de cultivos en función del clima. El modelo se puede dividir en dos sub-modelos, 1) crecimiento del cultivo y 2) suelo	(Li-xia, <i>et al.</i> , 2003)

Continuación de la tabla 1.

Modelo	Característica	Autor
El modelo de PORPORATO	Es un modelo basado en procesos. La materia orgánica del suelo se divide en cinco compartimentos (pools). Tres pools consisten en la materia orgánica del suelo (necromasa, humus y biomasa microbiana), y los restantes pertenecen al nitrógeno inorgánico.	(Porporato, <i>et al.</i> , 2003)
El modelo MOMOS 2-6	Simula la mineralización y las transferencias de ^{14}C y ^{15}N , presenta de 3 a 5 comportamientos, se centra en el de la biomasa microbiana: las entradas microbianas son las salidas de los otros compartimentos, y la salida microbiana se define por la respiración (la única salida de CO_2) y la tasa de mortalidad.	(Pansu, <i>et al.</i> , 2007),
EX-ACT	Herramientas que se encuentran actualmente disponibles para calcular las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y se calculan nivel de finca, o a nivel de proyecto.	(FAO, 2010)
FLUXNET	Estima flujos globales de carbono mediante técnica de Eddy Covariance, calculando el intercambio neto del ecosistema.	(Friend, <i>et al.</i> , 2007)
IMAGE	Es un modelo integrado para los efectos del cambio climático, integra módulos de suelo, agua, aire.	(Goldewijk, <i>et al.</i> , 1994; Minnen, 2008)

Existen otros modelos que simulan los flujos de carbono (Kurbatova, *et al.*, 2008), así como, balances y emisiones de CO_2 en suelos (Li, *et al.*, 2010; Nouvellon, *et al.*, 2008; Prentice, *et al.*, 2000). Meersmans, *et al.*, (2009) construyeron un modelo empírico basado en regresiones, para describir la relación entre la

profundidad del suelo, el carbono, la textura, el drenaje y el uso de la tierra en Flandes (Bélgica). Ponce-Hernández et al. (2004) presentaron metodologías, modelos y herramientas de software para analizar escenarios de cambio de uso del suelo, con el fin de identificar opciones de uso y manejo de las prácticas en la tierra que puedan maximizar la producción de alimentos y biomasa, el secuestro de carbono en el suelo y la conservación de la biodiversidad.

También se han realizado inventarios de carbono empleando técnicas como teledetección y modelización de ecosistemas para examinar las tendencias de la productividad, balance neto de carbono (Consejería de Industria Energía y Medio Ambiente, 2010; Turner, *et al.*, 2011) e inventarios de carbono en relación a su gestión (Kutser, *et al.*, 2005; Walker, *et al.*, 2004). Carvalho Leite et al., (2004) simularon la dinámica de la materia orgánica sobre un Acrisol bajo labranza cero y sistemas de arado mediante el modelo Century. Bottner, et al., (2006) aplicaron modelo Momos-6 para entender como las condiciones climáticas, la edad de barbecho y las propiedades del suelo afectan el ciclo del C y N en el sistema de materia orgánica del suelo.

El desarrollo de modelos dinámicos de carbono es un tema que en la actualidad se está explorando, muchos aplican los modelos existentes (Tabla 1), sin embargo para los ecosistemas tropicales y andinos los reportes son escasos. Las metodologías, estimaciones y escalas de trabajo son temas que deben ser analizados y mejorados, además es perentorio, el empleo de enfoques más integradores para la gestión del carbono (Tschakert, *et al.*, 2008), sobre todo de estudios a escalas locales y regionales, que tengan en cuenta (i) patrones y variabilidad de las fuentes y sumideros de carbono, (ii) interacción de los distintos flujos en los procesos y las interacciones con el clima, y (iii) la dinámica futura del sistema climático y del carbono, que incluyan las acciones humanas para gestionar el ciclo del carbono (Longdoz, *et al.*, 2000).

2.3 Enfoque para el estudio de carbono

Entender la dimensión de la problemática ambiental demanda definir el concepto de ambiente, el que se ha concebido cultural e históricamente como el medio o entorno biofísico que rodea o sirve de escenario a la actividad humana, y es usado

como medio, elemento o insumo para satisfacer las necesidades humanas (González, 2007). Esta concepción corresponde a la ruptura entre naturaleza y sociedad, propia de la cosmovisión de la modernidad; la dominancia del hombre sobre la naturaleza es producto de la visión antropocéntrica, base de los modelos de desarrollo económico imperantes, lo cual ha ocasionado la explotación indiscriminada de recursos y se ha consolidado como el origen de los llamados conflictos ambientales. Estos problemas-conflictos establecidos a lo largo de la historia, se han ubicado por fuera de la actividad social y se visualizan como problemas de o en los ecosistemas (Margalef, 1992); así, dada la crisis ambiental característica de nuestra época, de los impactos del pasado, de los actuales y de los esperados, junto con la no solución a estos, hicieron evidente la dilución y ruptura en la relación naturaleza-cultura; pues actualmente se ve la necesidad de generar esta integración, como esencial para abordar los aquí llamados problemas-conflictos, demandando la necesidad de un cambio en los paradigmas de esta relación, donde el hombre empieza a entender su papel sobre sí mismo y sobre su lugar en el mundo con respecto de su entorno (Bayón, *et al.*, 2006). En este sentido, la alteración en los ecosistemas ha conllevado a la evolución en la comprensión de las problemáticas que los afectan, modificando la percepción de la relación hombre-naturaleza, sujeto-objeto, propiciando la necesidad de estudios integrales, con nuevas formas de investigación basadas en el enfoque interdisciplinario y transdisciplinario, que propicien el diálogo de saberes y la asimilación de distintos modos de producción de conocimiento (Sáenz, 2007); de ahí, la importancia de abarcar las interrelaciones dinámicas existentes entre los ecosistemas y la cultura, que permitan el manejo adaptativo de sistemas complejos, para mantener su capacidad de resiliencia, y de ésta forma puedan ser conservados en el tiempo.

Lo anterior demanda propiciar el cambio continuo en las relaciones de conocimiento y práctica, así como la inclusión de la participación social y el apoyo de organizaciones y gobierno en la investigación científica. Mejorando las técnicas de comunicación entre científicos, tomadores de decisiones y comunidad en general, que propicien la vinculación de esfuerzos conjuntos y de difusión de información, para la gestión de los ecosistemas y sus interacciones (Newman, 2006). Así, la gestión de los recursos y la comprensión de fenómenos socio-ecológicos inmersos en estas problemáticas requieren interconexiones en la toma de decisiones, ya que tienen consecuencias reales para los ecosistemas y las

personas que dependen de los mismos, requiriendo así la comprensión de interacciones físico-biológicas en múltiples escalas espaciales y temporales que involucren el capital económico y social (Benda, *et al.*, 2002), donde los ecosistemas sean vistos como sistemas socio-ecológicos y multi-escalas, donde para su comprensión se involucre la participación de diferentes disciplinas y públicos (Potschin, 2009). Por ello, un concepto integrado para pensar en interacciones entre las personas y ecosistemas, se ha denominado sistema socio-ecológico (SES) (Berkes & Folke, 1998), el cual permite transmitir la noción de que los sistemas sociales y ecológicos están interconectados y que la brecha entre ellos es meramente artificial y arbitraria, y obedece a convencionalismos (Clark, 2006), y es uno de los enfoques que en el momento propicia la comprensión de los sistemas complejos y sus dinámicas ambientales. De esta forma, el pensamiento ambiental conduce a la exploración del saber ambiental, demandando la articulación de ciencias capaces de generar un pensamiento global y un método integrador del conocimiento disciplinario, para confluir en un saber que transgreda el campo de las ciencias monodisciplinares y cuestione la racionalidad lógico-positivista de la modernidad y más concretamente de la cultura occidental (Leff, 2006).

Problemáticas como el incremento de dióxido de Carbono (CO₂), la preocupación por el cambio global y el calentamiento global, han motivado los esfuerzos mundiales para entender mejor las dinámicas de los socio-ecosistemas, apoyando las investigaciones con nuevos enfoques de análisis, las cuales cada día sean más holísticas, complementarias, interdisciplinares y culturales. En conclusión, la comprensión y solución a problemáticas ambientales se basa en el diálogo entre investigadores, tomadores de decisiones y la sociedad en general, teniendo en cuenta metodologías basadas en la evaluación ambiental integrada, haciéndose necesaria, la comprensión desde una visión sistémica de relaciones, en donde se tenga en cuenta la relación hombre naturaleza.

Esta investigación tiene el enfoque sistémico, dada la necesidad de tener una visión sistémica del proceso del flujo del carbono, con sus relaciones e interdependencias suelo – planta – atmósfera – comunidades. Es así, que desde la teoría general de sistemas se puede dar cuenta de la visión holística del sistema a estudiar, que permita la concepción y contextualización de éste como un servicio ecosistémico estratégico, desde la perspectiva socio-cultural y ecológica en la

zona, que favorece el mejoramiento de la estructura y funcionamiento de suelos, que están íntimamente asociados con la productividad agrícola y regulación de gases, cuya permanencia y preservación en el ecosistema pueda procurar mitigación y adaptación al cambio climático.

Capítulo 3

Metodología

Contextualizar la información relacionada con el carbono en ecosistemas andinos, requiere tener claridad sobre como las principales funciones asociadas a las propiedades físico-químicas y biológicas de los suelos ándicos actúan para proveer el almacenamiento de carbono, identificando, las interacciones entre el suelo, agua, vegetación y actividades agrícolas de las comunidades humanas, integrando la afectación del clima.

Poder inferir como se pueden mantener las reservas de carbono orgánico y la fertilidad de estos suelo minimizando las emisiones de dióxido de carbono, requirió abordar esta investigación bajo tres pilares fundamentales que se acoplan con los objetivos específicos de este trabajo y que se orientaron, primero: determinar cuáles son los principales usos de los suelos que hacen las comunidades del área o zona determinada, buscando integrar dentro de los usos agrícolas áreas con cultivo de forraje, pasturas naturales y un sector referente de donde se tengan condiciones de poca o nula intervención. Para este estudio, el nivel de referencia fue el suelo de bosque natural. Posteriormente, se hizo necesario cuantificar las concentraciones de carbono en varios compartimentos del suelo y características relacionadas, para poder analizar el estado y la dinámica de cambio producto del uso del suelo. Segundo: se desarrolló el análisis de las relaciones del sistema socio-natural, identificadas a partir de entrevistas, talleres y procesos de observación, lo que dio un conjunto de datos e información que se integró al modelo de carbono que se propuso en esta investigación. El tercer pilar, es donde

se articularon los manejos dados al suelo y las características fisicoquímicas y biológicas a través del desarrollo de un modelo de la dinámica de almacenamiento de carbono, para comparar el comportamiento del carbono entre los tres usos del suelo, integrando la variable temporal, como determinantes del cambio y de los procesos que se quieren estudiar. A continuación se presenta el diagrama metodológico Figura 1.

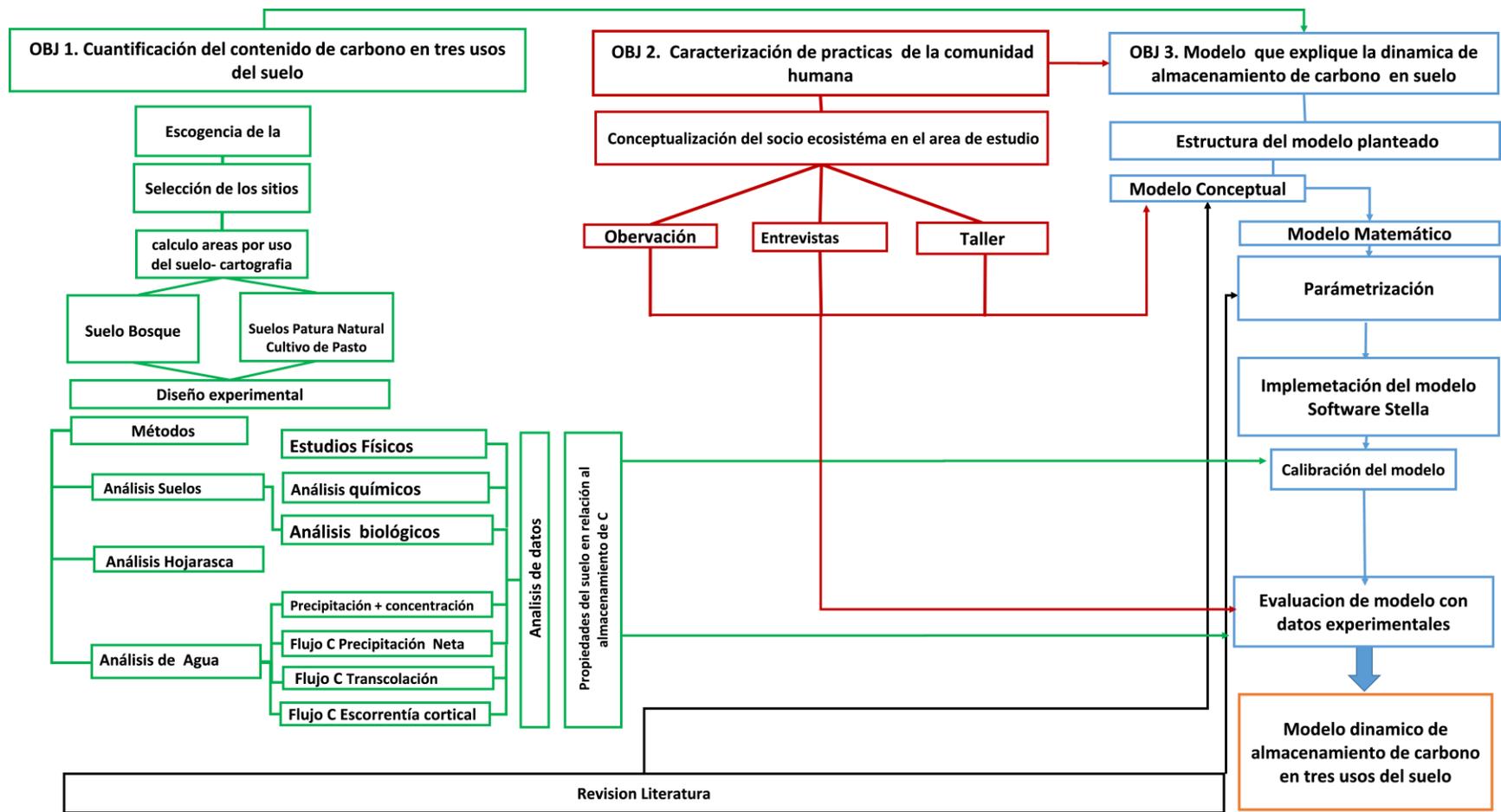


Figura 1. Diagrama del diseño metodológico de la investigación por objetivos específicos

3.1 Área de estudio

El estudio se realizó en la cuenca del río las Piedras representativa de los andes tropicales suramericanos por sus características fisiográficas. Está ubicada en las coordenadas 2°21'35" N y 76°33'10" O, con una extensión de 66,26 Km² y perímetro de 39 km. El relieve es montañoso, con pendientes entre 16-50%. Los suelos presentan propiedades ándicas (Andisoles), están formados principalmente de cenizas volcánicas, con textura media franco-arcillosa poco estructurada y bien drenada; poseen acidez fuerte con pH entre 4.9 y 5.0, con alta saturación de aluminio y bajas cantidades de calcio, magnesio y fósforo (IGAC, 2009). Posee un clima típicamente ecuatorial de montaña con los pisos térmicos templado, frío y de paramo, y con los pisos bioclimáticos subandinos y altoandinos, los cuales se ven afectados por los vientos alisios. La temperatura media varía entre los 10.4 °C y 18.4 °C (Corporación Autónoma Regional del Cauca, 2006). Tiene precipitaciones de tipo orográfico, con un promedio mensual multianual de 160.5mm. La mayor intensidad de lluvia se registra entre septiembre y mayo, y el periodo seco entre Junio y Agosto (Figura 2).

Esta área corresponde a las formaciones de bosque andino (Cuatrecasas, 1958); según la clasificación Holdridge pertenecen al Bosque Húmedo Premontano Bh-Pm. La vegetación se caracteriza por la presencia del Roble (*Quercus humboldtii*), Laurel (*Lauraceae sp*), Aliso (*Alnus acuminata*), Motilon (*Brunellia sp*), Arrayán (*Myrcianthes sp*), Encenillo (*Weinmannia sp*), Mano de Oso (*Oreopanax sp*), Huesillo (*Critoniopsis sp*), Siete cueros (*Tibouchina mellis*), Laurel de cera (*Myrica pubescens*), Coral (*Nectandra sp*), gramíneas, helechos, Melastomatáceas (*Trichanthera sp, alnus acuminata, Mimosa sp*), Guarango (*Mimosa sp*), *Palicourea angustifolia*), y cultivos de tubérculos y hortalizas.

La población de la cuenca está conformada por familias indígenas pertenecientes a las etnias Nasa del resguardo Páez de Quintana, Kokonukos del Cabildo de Puracé y por familias campesinas, comprendidos por la Asociación de Campesinos de Popayán y Red de Reservas ASOCAMPO y la Asociación

Campesina de Quintana Asoproquintana”¹, además cuenta con la presencia institucional de la Fundación río Las Piedras, UMATA y Corporación autónoma regional del Cauca (CRC). La población campesina muestra una forma de trabajo individual, mientras que los indígenas una tradición comunitaria. Es conveniente señalar que la producción agrícola se fundamenta en una agricultura de subsistencia, caracterizada por la presencia de unidades productivas de tipo familiar.

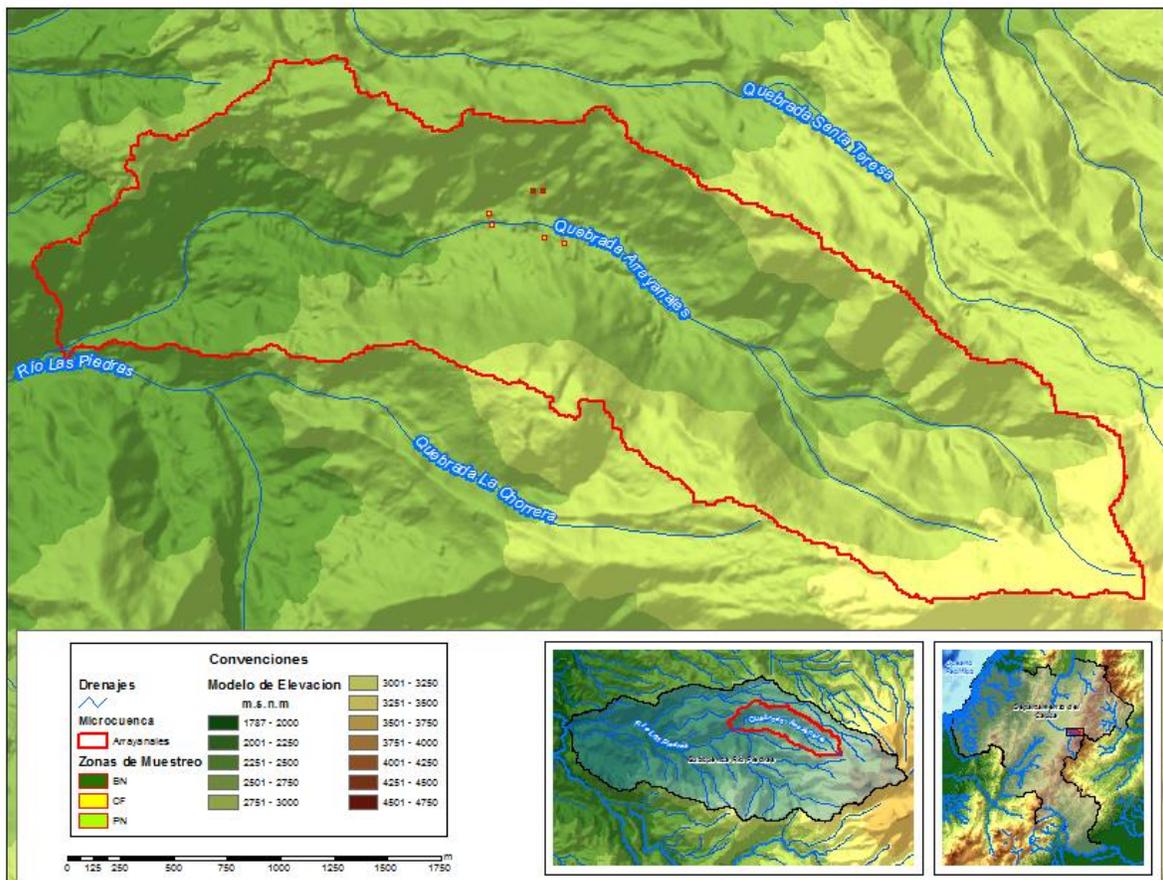


Figura 2. Cuenca del Rio las Piedras, ubicación de la microcuenca Arrayanales en la parte alta.

Las zonas andinas tropicales se caracterizan por su heterogeneidad, diversidad de vegetación y mezcla de diversos cultivos a cargo de pequeños agricultores. Se dedican principalmente al cultivo de papa, granos, tubérculos, legumbres y

¹ Acueducto de Popayán. Cuenca Piedras. Consultado el 28 de octubre de 2012 en: <http://www.acueductopopayan.com.co/gestion-ambiental/fundacion-procuenca-rio-las-piedras/fuentes-de-abastecimiento/cuenca-piedras/>

forrajes. El 90% de esta tierra es intervenida por el hombre. Los problemas de pobreza rural y las pequeñas explotaciones parecen estar ejerciendo gran presión sobre los recursos naturales. El manejo de los suelos en estas áreas también es diverso depende principalmente de la cultura, de la economía, de la ubicación geográfica y del acceso a la tecnología. En esta zona se le da alta importancia a la conservación del recurso hídrico y muchas de las prácticas están encaminadas al mantenimiento de bosques y cuidado del agua (Gamarra Vergara, 2007).

3.1.1 Selección de ventana de estudio

La identificación de áreas por uso de suelo se realizó mediante cartografía de la zona, obteniendo como resultado que los suelos están dedicados principalmente a áreas de protección (coberturas boscosa) con 1.848,9 ha (27,9%), ganadería (pastizales) 1.523,1 ha (22,9%), y agricultura 256,9 ha (3,9 %), el resto están entre producción (bosques plantados), minería, residencial y zonas de regeneración natural (Figura 3). El tipo y extensión de los usos del suelo se utilizaron como parámetros para decidir la localización y número de puntos de muestreo para la cuantificación de carbono.

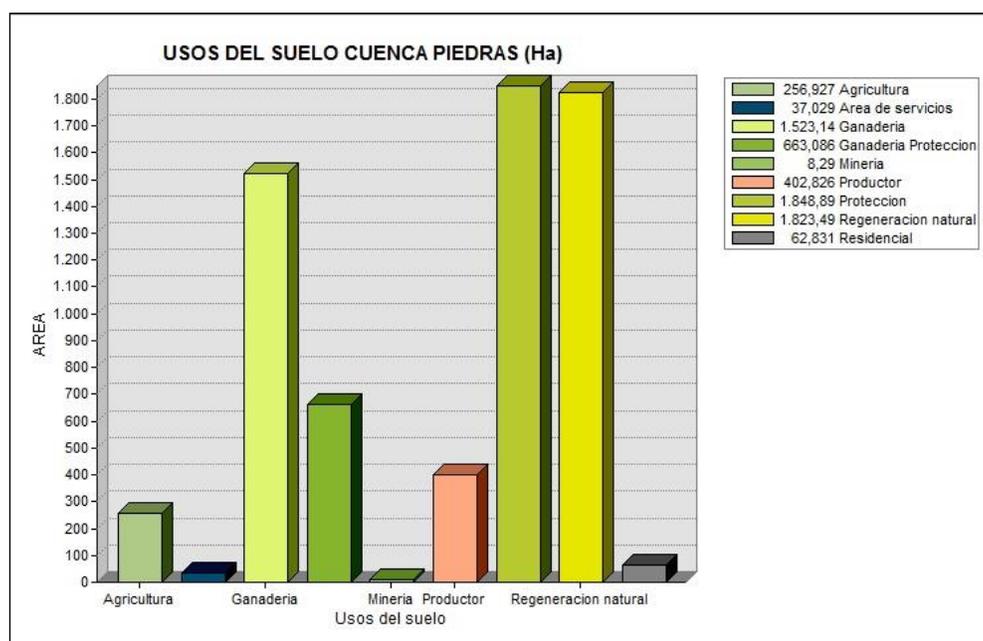


Figura 3. Usos del suelo cuenca del rio Piedras en hectáreas.

3.2 Selección de sitios de muestreo

Teniendo en cuenta los usos del suelo y la heterogeneidad de la cuenca en términos de microclima, coberturas, tipo y uso del suelo, se decidió estudiar la micro-cuenca Arrayanales con altura promedio de 2495 msnm., ubicada en la vereda Quintana, que cubre 594,08 ha. de la cuenca. El 50% corresponden a áreas de ganadería (pastura natural), 35% áreas de protección (bosque natural), y 15% dedicadas a la agricultura (cultivo de forraje). Las unidades experimentales (parcelas) se seleccionaron considerando el uso de Suelo, con sistemas de y pastura natural (Figura 4), cultivo de forraje (Figura 5) y bosque natural (Figura 6).

Pastura Natural (PN) (*Pennisetum clandestinum*), se realiza basado en la rotación de terrenos, en donde la tierra descansa con el propósito de recuperar y almacenar materia orgánica y humedad, normalmente se agregan compuestos nitrogenados como la “urea” y el esparcimiento del estiércol que permanece en los pastos luego del pastoreo del ganado (cada 3-5 meses), no existe riego, y las pendientes son menores a los 20 grados, cobertura con un tiempo de permanencia de 20 años.

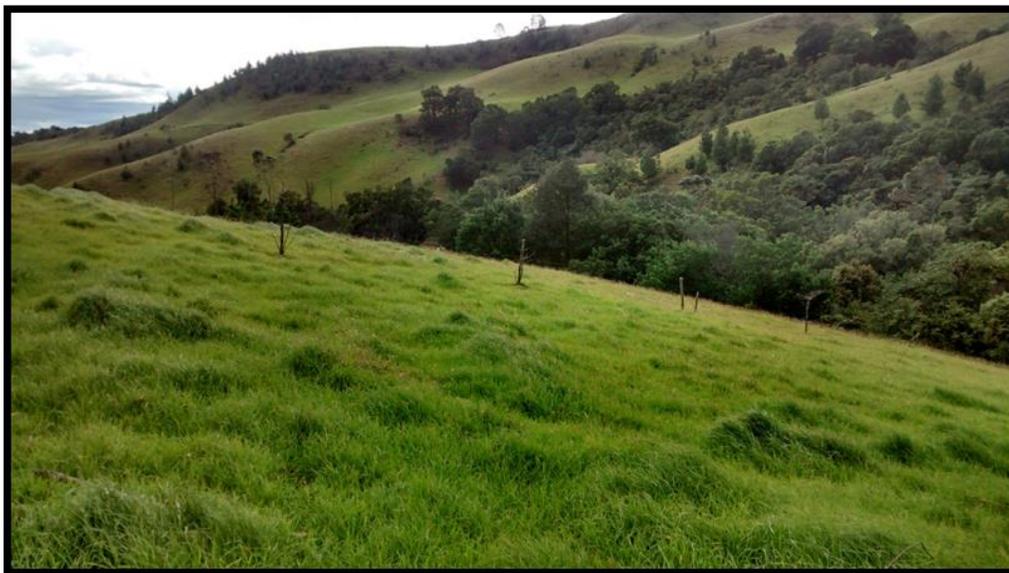


Figura 4. Foto pastura natural

Fuente: propia

Tomada: Mayo de 2013

Cultivos de Forraje (CF) (*Pennisetum Purpureum*), se realiza labranza manual, limpieza de malezas, agregados de abono orgánico (humus) producto del compostaje de estiércol y cal para mejorar el pH. Los cultivos se siembran paralelos a la pendiente, sin pisoteo del ganado. Tiempo de permanencia de 1 año, duración máxima de 5 años.



Figura 5. Foto Cultivo de Forraje

Fuente: propia

Tomada: Mayo de 2013

Bosque Natural (BN) las comunidades tienden a conservar estas áreas por medio del establecimiento de barreras en procura de la regeneración natural. A pesar de que la comunidad cocina con leña, el bosque natural ya no está siendo deteriorado, ya que para tal fin se han establecido áreas silvopastoriles y siembra de especies como las acacias y algunas coníferas para la extracción de madera, sin repercutir en las coberturas naturales. El bosque analizado hace parte de las reservas de la sociedad civil². Se caracteriza por tener alta diversidad a pesar de estar en un paisaje fragmentado, *Quercus humboldtii* es la especie con mayor peso ecológico, seguida por *Guarea kunthiana* A.Juss., *Myrcianthes* sp. O. Berg,

²“Son áreas protegidas privadas establecidas a voluntad de los propietarios de predios dedicados a la conservación de muestras de ecosistemas naturales”.

<http://www.parquesnacionales.gov.co/porta/es/ecoturismo/reservas-de-la-sociedad-civil/>

Nectandra reticulata Mez, *Chrysochlamys* sp. y *Croton* sp. La alta distribución diamétrica indica que presenta una alta dinámica generacional, el 70% de las especies tienen un DAP < 0.20m (Rovis, *et al.*, 2013). El suelo presenta una pendiente de diez grados. Esta cobertura tiene más de 40 años de existencia (Bolaños, 2012).



Figura 6. Bosque Natural Reserva Arrayanales (cuenca del río Las Piedras)

Fuente: propia

Tomada: Mayo de 2013

3.3 Análisis del sistema social

Se realizó una investigación de tipo cualitativo para conocer y caracterizar las prácticas y manejos que realizan las comunidades de la zona alta sobre los ecosistemas agrícolas y naturales de la cuenca Piedras; esto, con el fin de relacionarlos con el funcionamiento de los suelos y el servicio ecosistémico de almacenamiento de carbono.

Para lograr esta caracterización, se utilizó el método etnográfico que posibilita una aproximación a las personas y los grupos étnicos y socio-culturales. Esta estrategia permitió registrar el conocimiento que las personas tienen desde su interacción con el territorio, a partir del análisis de las prácticas y manejos realizados a los suelos de la zona, los cuales son producto de la experiencia y la significación social. En este sentido la etnografía, es una herramienta que permite

observar y describir en buena medida, la forma en que los grupos sociales se comportan, piensan, e interactúan con el medio (suelo, agua, vegetación), determinando así las relaciones objeto de estudio en esta investigación (Hammersley, *et al.*, 2001).

A continuación se definen las fases de la investigación etnográfica realizadas con la comunidad de Quintana (cuenca alta del río Las Piedras), las cuales no siguieron un orden y a veces se realizaron de manera simultánea:

Observación, la cual se refiere al registro de las actividades de los actores en la zona, relacionadas con las prácticas de preparación de suelos para uso agrícola y ganadero (arado, aplicación de fertilizantes). Esta se realizó en la reserva Arrayanales ubicada en la vereda Quintana, donde se tomaron las muestras para análisis físico químico y biológico de suelos, se acudió además a recorridos de campo y conversaciones con el administrador de la reserva y vecinos de la comunidad de Quintana; gracias a lo cual se logró generar espacios para la reflexión e interpretación de la manera general en que se dan las prácticas agrarias, y el respectivo uso dado a los bosques naturales de este territorio. Adicionalmente, la información obtenida, fue consignada en notas de campo que permitieron hacer una aproximación y caracterización de los manejos del suelo.

Entrevistas, se refieren a la profundización sobre las opiniones de la comunidad de Quintana, significados y acontecimientos ocurridos en el contexto de esta investigación. Se realizaron 15 entrevistas fueron dirigidas hacia diferentes actores como: líderes locales e institucionales, campesinos e indígenas que trabajan en la zona. Se realizaron al inicio y durante la investigación, fueron previamente concertadas por medio de la Fundación Río Las Piedras y líderes de Asocampo y Cabildo Indígena de Quintana; para su ejecución se llegó a los hogares, se explicó la finalidad de la investigación y a continuación se desarrolló el dialogo, que permitió profundizar, consignar, analizar, comparar la manera en que los distintos sujetos manejan y perciben el territorio.

Para complementar esta pesquisa, se realizó 1 taller participativo, dirigidos por el Grupo de Estudios Ambientales y la Fundación Río Las Piedras, convocando a la asociación de campesinos (Asocampo), contando con la asistencia de 40 personas. Donde el objetivo central fue indagar sobre las prácticas realizadas para producción agrícola y los manejos dados a los recursos naturales. Tras lo cual se pudo caracterizar y contextualizar la información necesaria, para entender y

modelar el almacenamiento de carbono y corroborar lo encontrado en el estudio cuantitativo de suelos; insumos necesarios para generar propuestas que permitan mejorar la producción agrícola y sostener los servicios ecosistémicos de la zona.

3.4 Diseño de muestreo de las propiedades del suelo

Teniendo en cuenta el área total dedicada a cada uso y resultados previos de porcentaje de carbono orgánico en los suelos, se aplicó la fórmula de Pearson, et al., (2005) para la delimitación del área de muestreo de suelos, obteniéndose: dos unidades experimentales (parcelas) para bosque natural, dos para pasturas y dos para cultivo de forraje. De esta forma, se aplicó un diseño experimental aleatorio estratificado con seis parcelas. Para la toma de muestras en cada parcela se elaboró una cuadrícula de 200 m², y en ella se tomaron 8 submuestras, cada 5 m en el horizonte 'A', correspondiente a una profundidad de 0.20 m en cultivo forraje y pastura natural, 0.30 m en bosque primario, analizando el total de muestras (576) para las propiedades químicas del suelo. En el caso de las propiedades físicas y biológicas de las 16 submuestras de suelo (16kg) se formaron tres muestras compuestas representativas de cada parcela, obteniéndose un total de 18 muestras compuestas en forma mensual, durante un período de 12 meses.

3.5 Métodos:

A continuación se definen los métodos utilizados para alcanzar los objetivos de investigación

3.5.1 Análisis de suelos:

Estudios físicos

Las muestras compuestas fueron secadas al aire y tamizadas por tamiz No.10 para determinar las propiedades físicas y químicas, siguiendo diferentes metodologías: Humedad higroscópica (%) por el método D 2216-05 (ASTM, 2008e). La humedad de campo se determinó gravimétricamente relacionando masa de agua y masa de sólidos del suelo, necesaria para expresar los resultados en base seca y comparar resultados en función del tiempo. La textura se determinó mediante el método de Bouyoucos por medio de un hidrómetro ASTM HYDR Fisher Brand (American Society for Testing and Materials, 2008b; ASTM,

2008b) y densidad aparente ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) por el método del cilindro (Malagon, *et al.*, 1995; Staff, 2004).

Análisis químicos

El pH se determinó potenciométricamente, en una pasta saturada de suelo y también en una suspensión suelo: agua, en relación 1:1 utilizando un pH – metro METROHM E-744® (Herisau, Suiza) con electrodo combinado de vidrio método 9045D (EPA, 2001). Se midió el pH por el método potenciométrico, relación suelo - agua 1:1 método 9045D.

El carbono orgánico total se realizó mediante el método de Walkey and Black oxidando el carbono orgánico presente en el suelo con $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 1N en medio ácido. Luego de 12 horas de reposo, cada muestra se determinó colorimétricamente en un espectrofotómetro SPECTRONIC GENESYS 20® (Madison, USA) visible a 585 nm (Schumacher, 2002).

El carbono contenido en el suelo (en tC ha^{-1}) se calculó a partir de los valores de porcentaje de carbono, densidad aparente y volumen de la muestra (área transversal de la muestra por la profundidad del muestreo) (Honorio-C. & Baker, 2010). El nitrógeno total: se determinó por el método de Kjeldahl (Bremner, 1960), a través de la determinación cuantitativa de N procedente de diversos materiales. Este protocolo consta de tres etapas, Oxidación de la muestra, Descomposición del sulfato ácido de amonio, Titulación del borato de amonio (APHA, *et al.*, 2005). Las determinaciones se realizaron en tres réplicas de cada muestra compuesta.

Análisis Biológico

La estimación de Biomasa Microbiana (BM), se realizó por el método de Fumigación extracción para cuantificar $\mu\text{g C gr}^{-1}$ suelo. Para ello, las muestras se fumigan con cloroformo libre de etanol y al mismo tiempo se dejan testigos sin fumigar; al cabo de tres días se extrae el carbono microbiano (Vance, *et al.*, 1987). La actividad microbiana CO_2 se realizó por respirometría (C- CO_2) según el método de Centro de Agrobiología del Brasil (Visser, *et al.*, 1992). Para ello, la muestra se incubó durante cinco días en un sistema cerrado (incubadora), se adicionó NaOH 1N y se precipitó con BaCl_2 , luego se adicionaron dos gotas de fenolftaleína.

Finalmente, se tituló con HCl 0.5 N para cuantificar el volumen de hidróxido que no reaccionó con el CO₂ se incluye siempre una muestra testigo o blanco.

Producción de CO₂

Se midió la concentración de CO₂ in situ como respiración total del suelo, mediante el uso del Sistema portátil con Analizador de gas infrarrojo LCI, ADC biocientífico Ltd, Hoddesdon, Inglaterra) suministrado por Cenicafe y mediante cámara de suelo acoplada. Las muestras se realizaron durante dos días entre los tres manejos del suelo, procurando tener el mismo número de muestras para obtener el comportamiento representativo para la los periodos de mañana (6:00-12:00 horas), tarde (12:01-18:00 horas) y noche (18:01 en adelante). En el momento de las tomas se midió la temperatura del suelo.

3.5.2 Producción de Hojarasca

Para el caso de muestreo de hojarasca en el suelo de bosque natural. La hojarasca incluye las hojas, los frutos, las flores y el material leñoso (ramas caídas con diámetro inferior a 0,10 m) sobre la superficie del suelo. Para la colección de la cosecha se utilizarán 5 trampas por parcela, de 0.78 m² de área (Salas, *et al.*, 2006; Vargas, *et al.*, 2007).

Las trampas se colectaban cada treinta días (Salas & Infante, 2006). Cada una de las submuestras de hojarasca se secó en un horno industrial a 60°C durante 48 horas (Salas & Infante, 2006). Posteriormente, se pesaron las submuestras en una balanza de precisión para obtener el aporte de biomasa en peso seco de cada fracción (Vargas & Varela, 2007). Con los valores obtenidos se calculó el total de toneladas de materia seca por hectárea (t. MS /ha) y posteriormente calculo la cantidad de carbono por hectárea (t. C /ha) (Rügnitz, *et al.*, 2009).

3.5.3 Análisis de agua

Se emplearon colectores para la medición de precipitación, translocación, Escorrentía cortical, y escorrentía superficial, retomando las metodologías empleadas en los estudios de Veneklaas (1990) y Burbano-Garcés, *et al.* (2014a) para bosques tropicales (Hanson, *et al.*, 2000). La toma de muestras se realizó cada mes, en horas de la mañana, se conformaron muestras compuestas con el agua recogida en los colectores ubicados en cada una de las parcelas de muestreo (Burbano-Garcés, *et al.*, 2014). Las muestras fueron conservadas y

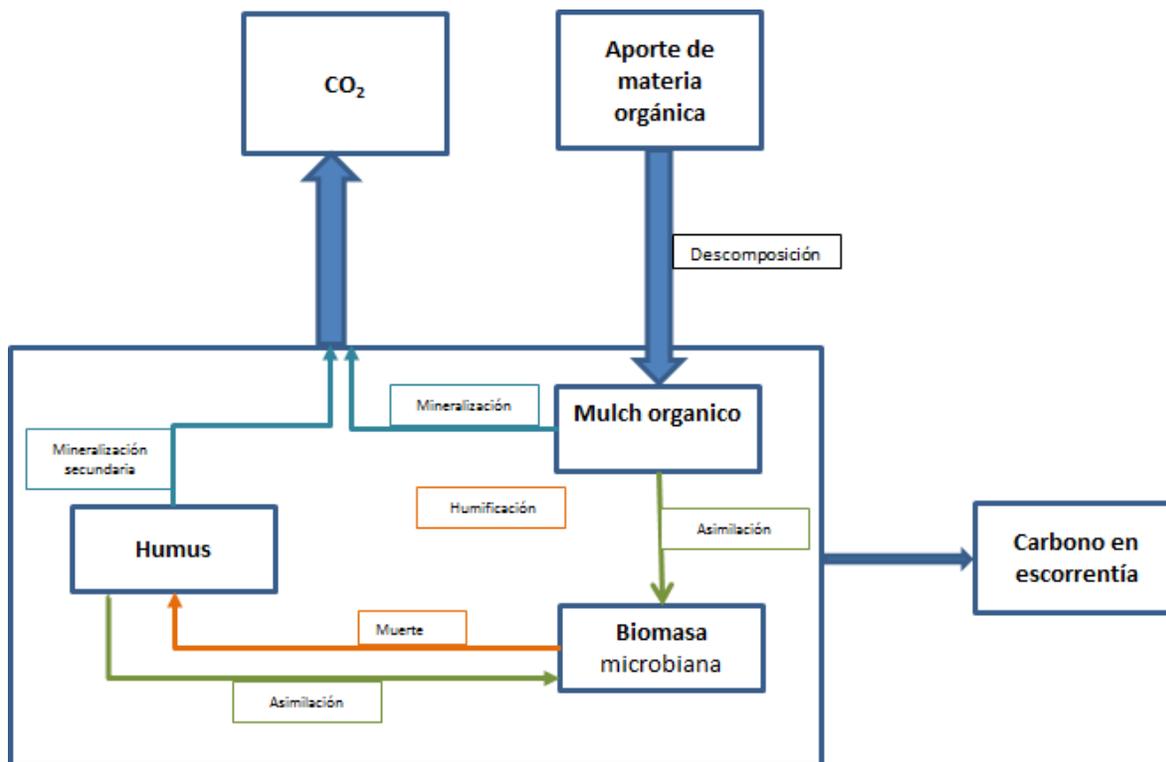
enviadas al laboratorio de análisis industriales de la Universidad del Valle, y fueron analizadas para COT mediante el método NTC 4781 mediante el analizador de carbono

3.5.4 Modelación de almacenamiento de carbono en suelos andinos

Dado que el propósito de los modelos es permitir la representación e interpretación del sistema real, a partir de la complejidad, el desarrollo de modelos se ha convertido en un reto científico y una necesidad tecno-política, con la intencionalidad de mejorar la comprensión científica de la dinámica de los principales ecosistemas en diferentes escalas (Minnen, 2008).

El modelo que se planteó en esta investigación pretende explicar la dinámica de almacenamiento de carbono asociado con el uso y prácticas realizadas en el suelo por parte de las comunidades humanas. El modelo tuvo en cuenta la escala temporal mensual donde interactúan todos los elementos que inciden sobre el proceso de almacenamiento de carbono, utilizando para ello los datos de las mediciones de concentraciones, los cálculos de flujo de carbono, y algunas constantes de transformación tomadas de referentes de la literatura científica.

Primero, se procedió al planteamiento del modelo conceptual de la dinámica del Carbono Orgánico en suelos, basado en la revisión de literatura y la caracterización de las prácticas realizadas por la comunidad de la zona (Figura 7). Se identificaron las variables de almacenamiento (reservorios), los flujos de entrada y salida. Las relaciones se basaron en el análisis previo entre las variables medidas experimentalmente que se relacionan con el almacenamiento de carbono, las cuales fueron medidas experimentalmente en la parcela 1 para cada uso del suelo. Posteriormente, se procedió a la representación del modelo de carbono en el programa Stella® (Figura 8). Se definieron los parámetros cinéticos y sus rangos de variación soportados en la teoría para sistemas del mismo tipo, con el fin de obtener un intervalo de referencia para realizar el proceso de calibración. El balance de masa se definió para cada uno de los almacenamientos (reservorios), basado en las entradas, salidas y transformaciones de carbono ($\text{Kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), finalmente se realizó la simulación para un tiempo determinado, verificando el ajuste del modelo a los datos de la parcela 1 y evaluando el modelo con los datos de la parcela 2.



Fuente: elaboración propia

Figura 7. Modelo conceptual del almacenamiento de carbono en suelo.

Herramienta de modelación

El programa Stella (Structural Thinking Experimental Learning Laboratory with Animation), es un programa de simulación por computadora que proporciona un marco de referencia y una interfase gráfica al usuario para la observación e interacción cuantitativa de las variables de un sistema, facilitando la construcción de sistemas dinámicos. Incluye un lenguaje de programación procedimental que es útil para ver y analizar las ecuaciones que se crean como resultado de la manipulación de los iconos. Su compañía fabricante es See Systems. Cada respuesta del programa está definida por un diferencial de tiempo, el cual se determina al momento de introducir los datos al modelo. Matemáticamente, el sistema está orientado a la formulación de modelos como los sistemas de ecuaciones diferenciales ordinarias. El usuario coloca los iconos para cada una de las variables de estado (reservorios) y luego los conecta por flujos de relaciones de materiales. A continuación, el usuario define las relaciones funcionales que corresponden a estos flujos. Estas relaciones pueden ser matemáticas, lógicas,

gráficas o numéricas. Los reservorios de material pueden ser la población, la biomasa, nutrientes, o dinero, entre otros; están conectados mediante flujos de materiales, de entrada y salida de las fuentes y sumideros indefinidos (representados por "nubes" en los extremos de las estructuras de flujo). Estos flujos se ven afectados por las variables auxiliares, acciones y otros flujos a través del uso de las flechas de información. Las variables auxiliares pueden adoptar la forma de constantes, funciones matemáticas o gráficos, y conjuntos de datos (Figura 8). Los detalles sobre la forma en que el usuario define las condiciones iniciales, relaciones funcionales, y los valores de los parámetros, genera una salida. El software lleva a cabo el análisis de sensibilidad (Costanza, *et al.*, 2001).

Almacenamiento (Stock-reservorio): Es un símbolo genérico para cualquier comportamiento que acumula o consume recursos.

Flujo: Un flujo es la tasa de cambio de un almacenamiento.

Convertidor: Un convertidor se utiliza para tomar datos de entrada y manipularlos para convertir esa entrada en alguna señal de salida.

Conector: Un conector es un vector que le permite a la información pasar entre: convertidores; stocks y convertidores; stocks, flujos y convertidores.

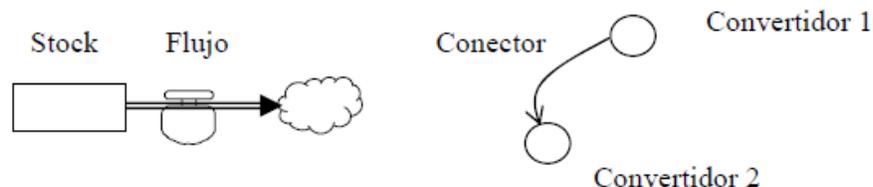


Figura 8. Elementos básicos del programa Stella

3. 6 Análisis de datos

Los datos obtenidos fueron procesados en el paquete estadístico RWizard (Guisande, *et al.*, 2014), mediante el cual se realizaron análisis multivariados para conocer la influencia del uso del suelo y del tiempo de muestreo sobre los análisis

fisicoquímicos y biológicos. Adicionalmente, se realizaron correlaciones paramétricas y no paramétricas y regresiones para conocer la influencia entre variables, y el ajuste entre los datos modelados y los experimentales.

Capítulo 4

Interacción del sistema social-natural: desde el enfoque servicio ecosistémico en el área de estudio

La necesidad de entender la potencialidad de los sistemas naturales de proveer beneficios requiere de un marco conceptual que integre tanto la dimensión biológica como la humana, mediante el análisis de los servicios de los ecosistemas (Binder, *et al.*, 2013; Martín-López, *et al.*, 2009). En la actualidad, el estudio de los servicios ecosistémicos ha cobrado importancia, sin embargo, muchos de ellos se desconocen o no son lo suficientemente valorados (Daily, 2000), en consecuencia no son considerados por las instituciones con capacidad de gestión (Martín-López, *et al.*, 2009). Por ello, el conocimiento de las relaciones entre los distintos actores sociales y los servicios brindados por el sistema suelo, permitirán la valoración desde diferentes perspectivas para la construcción de planes de manejo y políticas públicas adecuadas, en sintonía con la conservación de las funciones del suelo para proveer beneficios directos como la provisión de alimentos e indirectos como la regulación climática.

Estudiar las relaciones entre el sistema social y natural, implica analizar como el ser humano afecta a la integridad de los sistemas naturales, y como esta afectación repercute en el bienestar humano. De esta forma, se reconocen los estrechos vínculos entre sistemas naturales y bienestar humano, integrados en el sistema socio-ecológico SSE (Berkes & Folke, 1998). Por ejemplo, los cambios de

usos del suelo, afectan directamente el estado del sistema natural, alterando su estructura y funcionamiento, en consecuencia la provisión de SE al sistema social (OSE, 2011). Sin embargo, una vez transformados los sistemas naturales, la continuidad de la provisión de SE, como el almacenamiento de carbono, la fertilidad de suelos, provisión de alimentos y regulación del recurso hídrico, entre otros, dependerán de las gestiones adecuadas.

Por ello, el entendimiento de la dinámica de almacenamiento de carbono en el suelo hará visible su interdependencia con otros SE; así, su disminución o incremento tendrá un efecto sobre otros (Power, 2010); de esta forma, el equilibrio dinámico o trade-off (balance de pros y contras) entre SE, implicará necesariamente el análisis desde todas las perspectivas posibles, entre beneficios y perjuicios en función de los intereses de los usuarios. De esta forma, los beneficios directos para algunos usuarios podrían reflejarse en otros, potenciando así la provisión de multiservicios (Lescourret, *et al.*, 2015). Por ejemplo, el mantenimiento de la fertilidad del suelo promueve el reciclado de nutrientes y la productividad primaria, lo que implica un aumento en la capacidad de almacenar carbono y por tanto, de regulación de clima. Además, un suelo fértil implica menores tasas de erosión y, por ende, favorece la calidad del agua. Es importante que la evaluación de la provisión de servicios se realice inicialmente a partir del análisis de la capacidad que tienen los sistemas naturales para generar servicios, y posteriormente desde la evaluación socio-cultural y económica (OSE, 2011). Es por ello, que esta investigación parte de conocer cómo el suelo tiene la capacidad de proveer el servicio de almacenamiento de carbono.

Así, la caracterización del sistema social y la interacción con las funciones naturales que proveen almacenamiento de carbono, permitió entender cuáles son los impulsores directos que determinan la dinámica de almacenamiento de carbono, la cual fue posteriormente modelada y comparada entre distintos usos del suelo (capítulo 5 y 6).

En este orden de ideas, las interacciones entre el sistema social y natural en la cuenca del río Las Piedras son importantes, especialmente por los procesos de fortalecimiento social de sus habitantes, representado en comunidades campesinas e indígenas, quienes a través de sus organizaciones trabajan activamente en los procesos de gestión ambiental de la zona. Los diferentes

actores de la cuenca tienen el propósito de organizarse y alcanzar objetivos ambientales y agrícolas que potencien la regulación y calidad del recurso hídrico, los cuales dependen de la conservación y preservación de los sistemas naturales.

Por ello, la comunidad de la zona hace parte de un pacto de convivencia firmado en el 2002, en el cual se reconocen los principios de convivencia y los diferentes intereses sobre el territorio de la cuenca, la disposición a crear un clima pacífico de diálogo entre actores y la búsqueda de una convivencia armónica entre la conservación ambiental y el desarrollo social. Estos procesos han sido adelantados por las actuaciones de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Popayán S.A. E.S.P. con la División Ambiental, quien coordina y hace seguimiento a las actividades de planificación del uso del suelo, conservación del recurso hídrico y recuperación de la cuenca abastecedora del recurso hídrico de Popayán (Acueducto y Alcantarillado de Popayán).

Las actividades socio-económicas y culturales, se desarrollan en torno a la conservación del agua. Para ello, han adaptado las prácticas agropecuarias con bajo nivel de impacto sobre el sistema natural y han dedicado esfuerzos en la protección de bosques. Así, las funciones de regulación de la calidad y cantidad del recurso hídrico en la zona han potenciado otros servicios ecosistémicos como la regulación de la erosión y la captura de carbono.

Adicionalmente, se identificó que los campesinos que pertenecen a la Asociación de Campesinos de Popayán Red de Reservas ASOCAMPO, en su mayoría (80%) tienen adscritas sus áreas de bosque natural a La Red de Reservas de la Sociedad Civil, redes que se establecieron a partir del 2001 en la zona, las cuales constan de 64 predios que se han cercado para tener nula intervención. En ellos, se realiza la conservación de bosques de roble dominantes de la zona, la ampliación de senderos biológicos mediante la regeneración con especies nativas como el Umui, Nacedero, Chachafruto y Leucaena. La leña que utilizan para cocinar y construir postes se colecta de los árboles que han sembrado para este uso, como son pequeños bosques de acacia y cercas vivas. Estas medidas de conservación han sido acogidas también por otros habitantes de la zona y son replicadas y guiadas por las instituciones como La Fundación Río Las Piedras.

A pesar de que los análisis de suelos no fueron realizados en la zona indígena de la cuenca, los indígenas son considerados actores importantes de la misma, por ello, se entrevistó a un representante del cabildo de Quintana para tener conocimiento de su visión sobre el manejo de los suelos. Así se pudo conocer que esta comunidad indígena quien por muchos años ha practicado las quemas de rastrojos, ha modificado esta práctica considerada tradicional, para no generar la pérdida de arvenses, que cumplen una función de fijación y retención de nutrientes, así como de protección del suelo. “Las rosas (talas) se evitan, ya que se ha tomado conciencia como parte de los programas ambientales, ahora se pica la tierra con pala”. Al igual que los campesinos, esta comunidad también ha adaptado el uso de insumos agrícolas de tipo orgánico con la intencionalidad de no generar contaminación por uso de agroquímicos que puedan llegar a los cauces naturales.

La complejidad de los sistemas, las asociaciones múltiples entre funciones y la provisión de diversos servicios ecosistémicos exigen a los actores del territorio e instituciones, evaluar y mejorar las prácticas realizadas sobre los sistemas naturales, porque existen algunas que benefician ciertos procesos pero tienen consecuencias sobre otros. Algunos ejemplos han demostrado que las entradas suplementarias y manejos agrícolas aceleran los procesos naturales; en los cultivos de manejo intensivo, los fertilizantes proporcionan el 50% del nitrógeno utilizado por el cultivo, el resto proviene de la mineralización de la materia orgánica. Por otra parte la mayoría de las plagas y patógenos se mantienen bajo control, no por los pesticidas sino por enemigos naturales, y diversas estrategias de defensa de las plantas (Hajek, 2004). En consecuencia, el uso de pesticidas tiene efecto deletéreo sobre los sistemas porque no distinguen de los efectos adversos sobre la plaga y sobre los controles naturales. De igual forma, el uso de fertilizantes químicos se utiliza para incrementar la producción agrícola, pero produce contaminación de aguas creándose una correlación negativa (Lescourret, *et al.*, 2015). Por ello, la gestión colectiva es clave para lograr compromisos y soluciones, minimizando conflictos de valores y permitiendo el suministro de multiservicios relacionados (Termorshuizen, *et al.*, 2009).

En relación al uso de fertilizantes químicos por los campesinos, se identificó que la mayoría no los utilizan, debido al imaginario de que si se emplean se pueda producir dependencia, descenso en la productividad, y además porque al usar

fertilización orgánica se pueden comercializar mejor los productos; Por otro lado, algunos productores hacen uso de un sistema mixto, el cual apunta a ser más orgánico que químico. Esto ha sido tradición en la zona, y además es el principio de las asociaciones de campesinos; como se ha expresado, lo anterior se genera por la interacción institucional que comunica y enseña (Fundación río Las Piedras, Asocampo, cabildo) generando un nivel de asociatividad que interviene en la configuración del sistema socio-ecológico SSE de la cuenca. Anderies, et al., (2004) sugieren que el SSE está intrincadamente enlazado y afectado por uno o varios sistemas sociales, expresándolo más directamente como un subconjunto de sistemas sociales (comunidad indígena y comunidad campesina), donde algunas relaciones e interacciones que suceden entre los seres humanos se ven afectadas por las interacciones con las instituciones, como la creación de un accionar cultural normativo y de política. Siendo estas una de las claves del sistema, puesto que las configuraciones institucionales afectan las interacciones entre los distintos elementos de la interacción entre los sistemas sociales y naturales, comunicando, enseñando u orientando el accionar de las comunidades.

Siguiendo con lo descrito, se puede exponer que el manejo de tipo orgánico para producción agrícola es predominante en el 70% de los casos. El 90% de los productos agrícolas de la zona son para consumo propio (hortalizas, papa, maíz), se siembran en pequeñas huertas. El cultivo de mayor área es el pasto de forraje.

Otra práctica empleada por los campesinos para incrementar el pH de los suelos ácidos de la zona es la aplicación de cal (Ca y Mg) y cenizas producto de la combustión de madera. Lo anterior se puede explicar porque las cenizas son ricas en elementos Ca, K, Mg, Al, Fe, por lo tanto, pueden actuar como encalante de suelos ácidos debido a su carácter alcalino (Etiégni, *et al.*, 1991), y así favorecer la movilización de nutrientes minerales en el suelo, estimulando la actividad microbiana y la mineralización en el suelo (Demeyer, *et al.*, 2001). Sin embargo, la aplicación de cal no se realiza en una dosis según la necesidad del suelo, se basa en sus sentidos, desconociendo que si se aplican cantidades muy elevadas o si el tratamiento es demasiado frecuente, el pH se elevará por encima del rango ideal para la mayoría de las plantas. Un pH demasiado básico puede inmovilizar los fosfatos, que son ingredientes clave en muchos fertilizantes. Un pH alto también puede hacer que los micronutrientes como el cobre, el boro, el manganeso, el hierro y el zinc se vuelvan inaccesibles para las plantas. En el momento el pH de

los suelos cultivados está entre 5.5 y 6.5, lo cual es óptimo para la absorción de nutrientes para las plantas cultivadas.

El control fitosanitario se realiza con un manejo integral de plagas y minimización del uso de pesticidas químicos, técnica aprendida de los padres, a través de muchas generaciones. Algunos ejemplos de estas preparaciones caseras para lavar los cultivos son: ají, caléndula, ajo o ruda. Los campesinos de la zona también recurren en ocasiones a plantas con propiedades alelopáticas, plantas que emiten sustancias químicas que repelen a insectos y otras plantas. Algunas utilizadas en la cuenca con estas propiedades son la mostaza y el paico ruda. Estos manejos cumplen la función de repeler los insectos, sin afectar los cultivos. Diversos autores afirman que esta práctica minimiza el riesgo de que los insectos desarrollen resistencia y a la vez disminuyen las consecuencias letales para los enemigos naturales, en definitiva es menos nocivo para el hombre y el ecosistema (Salazar, *et al.*, 2009).

El desarrollo agropecuario es relevante en la economía de la cuenca, por cuanto genera la mayor fuente de ingresos para los habitantes de la zona; en el caso de la actividad ganadera se destacan las explotaciones doble propósito (leche, lidia y levante). Se manejan grandes extensiones en el caso de los campesinos, mientras los indígenas solo trabajan en 3-4 hectáreas, las dos, con un bajo impacto sobre el suelo (2-3 vacas por hectárea). Las pasturas naturales son cultivadas en poca intensidad, es decir, estas son poco intervenidas por actividades de remoción de suelos o arado. Una vez el ganado se alimenta, se realiza el esparcimiento de la boñiga y aplicación de urea. La producción de leche no sobrepasa los 40 litros diarios por finca. La comercialización de leche se da a través del acopio por canales informales, y en otros casos se produce queso casero que se comercializa en la zona o en el mercado de Popayán.

Las prácticas para preparación de tierras se realizan en un 100% de forma manual, disponen el suelo en eras o surcos perpendiculares a la pendiente para no tener pérdida de nutrientes. Realizan deshierbe mediante eliminación manual, y en los periodos prolongados de sequía utilizan riego.

En este sentido parte de las buenas prácticas ecológicas adoptadas por las comunidades, se deben a la influencia de la empresa de acueducto y alcantarillado de Popayán-Fundación río Las Piedras, que mediante programas de

educación ambiental han propiciado prácticas de protección ambiental (aislamiento, reforestación y siembra de cercas vivas), producción agrícola de menor impacto (orgánicas, rotación de áreas de pastoreo), ecoturismo, y convenios para mejorar la convivencia (Acueducto y Alcantarillado de Popayán), estas acciones también las cumple el Cabildo indígena de Quintana. En este contexto, el territorio se concibe como espacio geográfico, social, cultural y económico que no está aislado, es dinámico y presenta complejas interrelaciones entre las interpretaciones de los entornos naturales y los generados desde la política de la institucionalidad que rigen en las ciudades. Todos estos procesos demuestran la importancia que los campesinos e indígenas de la cuenca dan a la conservación de bosques naturales y a la protección de sus fuentes hídricas; los han asumido puesto que estas prácticas, no están fuera de su visión de mundo y de la interpretación que realizan de su entorno, en otras palabras, estas acciones no agreden su cosmogonía, generando así su aceptación (Linck, 2001).

En conclusión, los actores de la cuenca han demostrado la eficacia para la gestión de sistemas naturales y agrícolas, el impacto antrópico en el suelo no es alto, puesto que el valor cultural y ecológico dado al agua, hace que gran parte de las prácticas en el territorio, estén encaminadas a la protección del bosque, a la producción limpia y al manejo consciente del agua. Para ellos, desde su percepción y aprendizaje, el agua es un bien común que debe ser protegido; al igual que los bosques que purifican el aire y hacen que exista biodiversidad, reconocen que la producción de tipo orgánico los beneficia, porque es libre de químicos nocivos para la salud, el suelo y el agua. La intervención de las instituciones, la Fundación río Las Piedras (Acueducto y Alcantarillado de Popayán), tiene un efecto positivo en la conservación ambiental desde todos los puntos de vista, y las compensaciones otorgadas por protección de bosques han permitido que las zonas de reserva se mantengan.

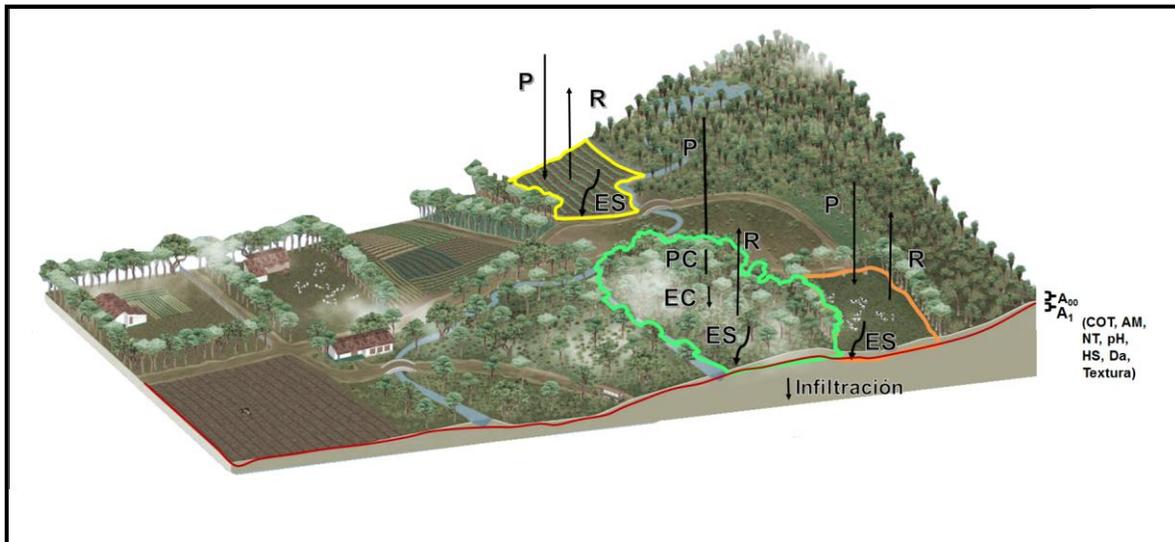
Adicionalmente, es necesario que sean comprendidos los procesos que permiten el funcionamiento de los ecosistemas, para que estos puedan proveer SE. Es importante combinar las investigaciones científicas, las posibles sinergias entre SE y los diferentes beneficios percibidos por el sistema social, pues de esta forma se podrá asegurar la toma de decisiones efectivas para asegurar que el flujo de SE pueda satisfacer las necesidades humanas, en el tiempo, en el espacio y entre actores. De esta forma, se debe continuar potenciando prácticas agrícolas

alternativas y el desarrollo de sistemas agrícolas con una dependencia mínima de agroquímicos, en los cuales las interacciones ecológicas y los sinergismos entre sus componentes biológicos provean los mecanismos para que los propios sistemas subsidien la fertilidad de su propio suelo, la productividad y su protección fitosanitaria (Altieri, 2011a). Es importante que se continúe con la cultura del valor de conservación en el deber de las instituciones y en la cosmovisión de las comunidades, primando el conocimiento sobre los procesos ecológicos de los cuales depende el suministro de SE.

Capítulo 5

Análisis de variables cuantificadas en relación con el servicio de almacenamiento de carbono en suelo

En este capítulo se describen y discuten los resultados de los análisis de las variables cuantificadas para determinar el almacenamiento de carbono en el suelo, comparando entre áreas de uso agropecuario (cultivo de forraje, pastura natural) y de protección (bosque natural), determinado los cambios producto del uso del suelo y la temporalidad (Ordoñez, *et al.*, 2015). En primera instancia, se presentan los resultados seguidos de la discusión enfocada en el almacenamiento de carbono, calidad del suelo y otros elementos involucrados en el desarrollo del modelo como son la respiración del suelo y los aportes de COT de los procesos hidrológicos. En la Figura 9 se representan los flujos de entrada y salida de carbono orgánico total de los tres sistemas estudiados.



Fuente: (Rivera-Ospina, et al., 2011)

Figura 9. Flujo de Carbono Orgánico Total (Kg h^{-1}) en tres usos del suelo para diferentes componentes: R= Respiración (CO_2), P= Precipitación, PC= Percolación, EC= Escorrentía cortical, ES= Escorrentía superficial, Horizonte de suelo A_{00} = Hojarasca y A_1 = Carbono orgánico total (COT) Y características físicas (Humedad del suelo (HS), Densidad aparente (Da), Textura suelo), químicas del suelo (pH, Nitrógeno Total (NT) y Biológicas (actividad microbiana (AM)).

5.1. Resultados

Resultados de las características físicas, químicas y biológicas del suelo

5.1.1 Características físicas entre los tres sistemas de manejo del suelo

Las características físicas de los suelos fueron modificadas por las prácticas de manejo en esta región (Tabla 2). La Da fue diferente entre meses ($F=10,38$, $p<0.001$). La Da fue menor para PN que BN y CF ($F = 9.83$, $p < 0.001$ de bosque en abril de 2012 y junio de 2013, pero mayor durante Septiembre 2012, Diciembre 2012, marzo y Abril 2013 (Figura 10).

La humedad higroscópica (HH), fue modificada por el uso del suelo: PN tiene el más alto contenido entre CF y BN ($F=976,84$, $p<0.001$). Existe cambio con el tiempo ($F=24.53$, $p<0.001$) (Figura 10) y la interacción tiempo por manejo del suelo ($F=26.95$, $p<0.001$). La PN tiene la más alta HH que BN y CF.

La Humedad del suelo (HS) varió entre usos del suelo ($F=37.88$, $p<0.001$) y significativamente en el tiempo ($F= 899.48$, $p<0.001$) (Figura 10) y la interacción

entre uso y manejo ($F=171.58$, $p<0.001$): siendo los meses de enero a abril de 2013, los mayores registros de HS para el BN y la PN, en los meses de septiembre y diciembre de 2012 se hallaron menores registros de HS para los tres manejos. Los tres manejos mostraron alta variación estacional, en abril de 2013 donde presentó la mayor HS ($72.89\% \pm 0.94$) concomitante con una alta precipitación (>200 mm) y en septiembre de 2012 la menor HS ($43,01\% \pm 0.90$) con baja precipitación (< 5 mm).

La Textura del suelo varió con el tipo de manejo. Para el BN fue franca y franca arenosa, en PN y CF la textura fue franco arenosa. El porcentaje de arena y limo varían con el uso del suelo (arena $F=165.67$, $p<0.001$, y limo ($F=153.98$, $p<0.001$), pero la arcilla no presenta cambios en los tres usos (BN, CF, PN) (*Figura 10*).

Tabla 2. Medias y errores estándar de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo en tres de usos del suelo: pastura natural (PN), cultivo de forraje (CF) y bosque natural (BN).

Características del suelo		BN	PN	CF
Físicas	Densidad Aparente (g.cm^3)	0.71(0.008) a	0.66(0.005) b	0.70(0.004) c
	Humedad Higroscópica (%)	9.57(0.10)a	13.90(0.17) b	10.83(0.29) c
	Arena (%)	51.29(0.32) a	56.92(0.16) b	64.80(0.25) c
	Limo (%)	38.36 (0.32)a	32.69(0.14) b	24.39(0.29) c
	Arcilla (%)	10.34(0.03) a	10.39(0.04) a	10.80(0.14) a
	Humedad del Suelo (%)	64.80(1.44) a	66.20(1.31) ab	64.25(0.83) ac

	C (%)	5.20(0.10)a	9.65(0.12)b	7.63(0.10)c
	pH	4.68(0.02)a	5.38(0.02)b	5.21 (0.03)c
	Nitrógeno Total (%)	0.59(0.01)a	0.99(0.01)b	0.77 (0.02)c
Químicas				10.24
	Relación C:N	8.95(0.16)a	9.86 (0.19)b	(0.21)c
	Relación C:N	13.67		
	Hojarasca	(0.25)		
	Carbono Orgánico Total (ton.ha ⁻¹)	111.12(2.53)a	126.67(1.50)b	110.03(1.53)a
Biológicas	Actividad microbiana (mg CO ₂ .g ⁻¹ .d ⁻¹)	119.08(2.68)a	144.83 (3.74)b	173.44(4.30)c
	Biomasa microbiana(mg CO ₂ .g ⁻¹)	199.95(9.73)a	195.80 (7.94)a	100.38 (9.39)b
	Coeficiente metabólico	0.75(0.06)a	0.85(0.04)b	2.46(0.14)c

*La letras (a,b,c) indican una diferencia estadística significativa entre manejos del suelo ($p < 0.05$).

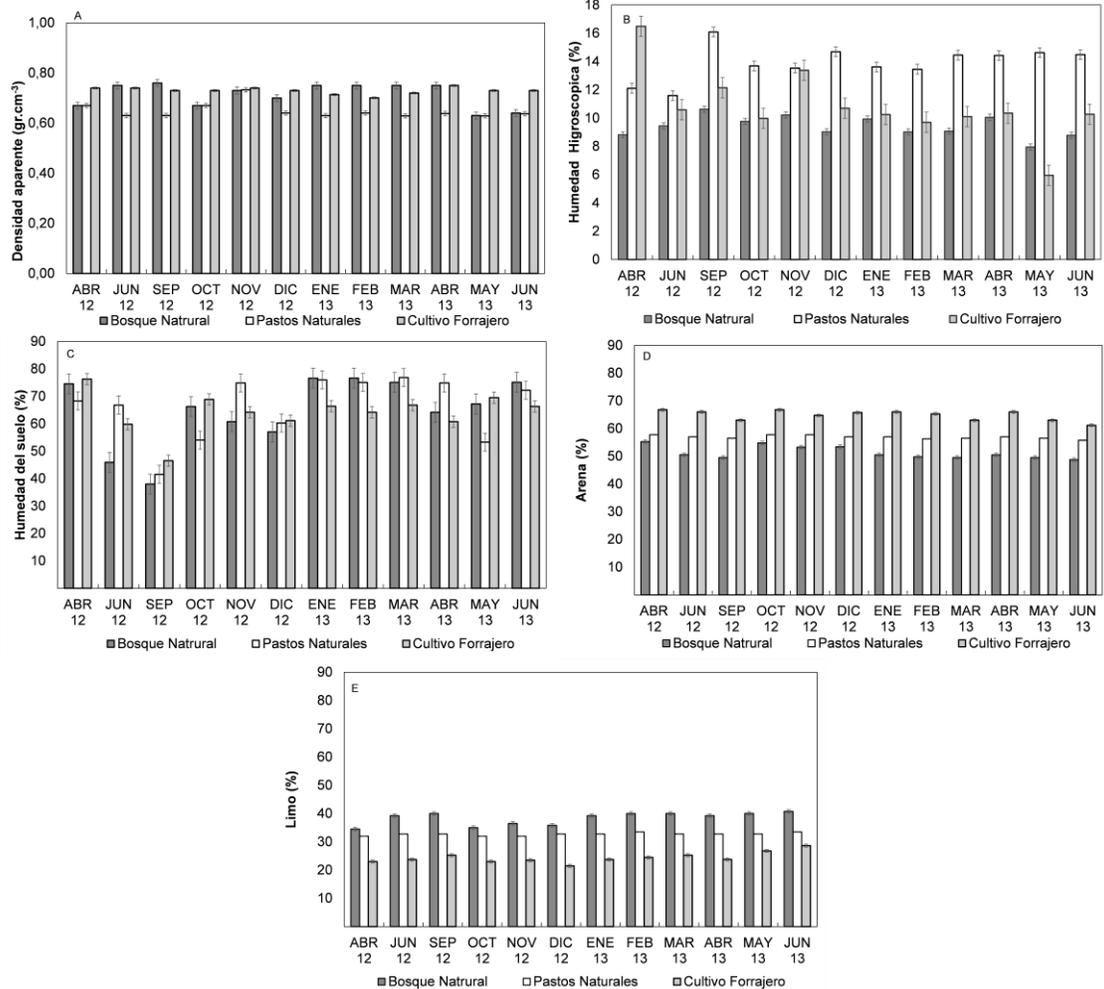


Figura 10. Características de las propiedades físicas del suelo durante el tiempo de estudio: A) Densidad Aparente, B) Humedad Higroscópica, C) Humedad del suelo, D) Arena, E) Limo, comparado en tres de usos del suelo: bosque natural (BN), pastura natural (PN) y cultivo de forraje (CF).

5.1.2 Características químicas entre los tres sistemas de manejo del suelo

El porcentaje de carbono orgánico (CO) en PN fue 1.3 veces mayor que en CF y 1.8 veces que en BN ($F=498.90$, $p<0.001$), y varió significativamente en el tiempo ($F= 36.18$, $p<0.001$), y con la interacción del suelo ($F=14.38$, $p<0.001$). El porcentaje de CO fue mayor en PN excepto en abril y junio 2012; el porcentaje de CO en CF fue mayor que en BN.

Los suelos de los tres manejos mostraron un pH fuertemente ácido, sin embargo el suelo de BN fue significativamente más ácido (4.68 ± 0.06), que los suelos de CF y PN, respectivamente ($F=243.22$, $p < 0.001$) (Tabla 2). No hubo cambios significativos estadísticamente. La concentración de Nitrógeno total (NT) varió significativamente con el tiempo (41.12 , $p < 0.001$) y en la interacción con el manejo por uso del suelo ($F=28.99$, $p < 0.001$). El (NT) en PN fue significativamente superior que CF y BN, pero CF tiene más alto NT que BN en abril, junio, septiembre, octubre 2012, marzo, abril y junio 2013 (Figura 11). No se observaron diferencias significativas con la época de lluvias o con la temperatura del ambiente. La relación C: N del suelo varió con el uso del suelo ($F= 34.44$ y $p < 0.001$): el suelo de CF tiene el cociente C: N más alto (Tabla 2), seguido por el suelo de PN y el suelo de BN. La relación C: N vario con el tiempo ($F= 12.59$, $p < 0.001$) (Figura 11) y con la interacción del uso por el tiempo ($F=39.186$, $p < 0.001$).

El PN tiene un alto contenido COT (carbono orgánico total) comparado con BN y CF ($F= 12.59$, $p < 0.001$) (Tabla 2). El COT varió significativamente con el tiempo ($F=39.18$, $p < 0.001$) (Figura 11) y con la interacción del tiempo por el uso del suelo ($F=9.58$, $p < 0.001$). En PN el COT fue mayor que BN y CF en todos los meses excepto septiembre 2012 y octubre.

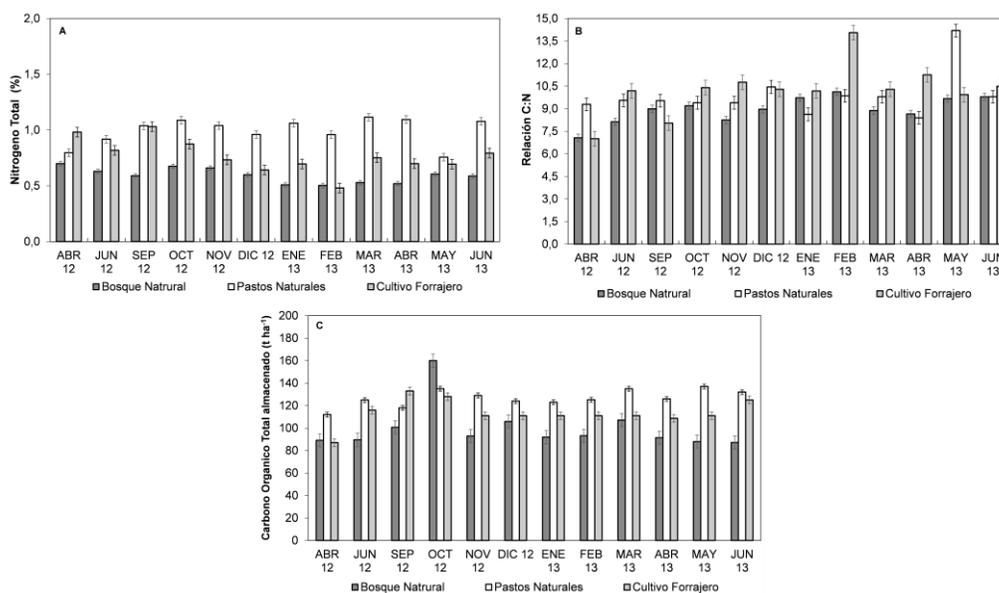


Figura 11 Características de las propiedades químicas del suelo durante el tiempo de estudio: A) Nitrógeno Total, B) Relación C: N, C) Carbono Orgánico Total, comparado en tres de usos del suelo: bosque natural (BN), pastura natural (PN) y cultivo de forraje (CF).

5.1.3 Características biológicas entre los tres sistemas de manejo del suelo

El suelo de CF presentó la mayor actividad microbiana (AM), seguido por PN, y el BN ($F= 3964$ y $p < 0.001$), siendo diferente entre los tres usos del suelo. La (AM) vario con el tiempo ($F= 737.92$, $p < 0.001$) (Figura 12), y presenta un patrón estacional influenciado directamente por la época de lluvias. (Noviembre tuvo el valor más alto para todos los usos del suelo). También existe variación entre la interacción entre el uso y el manejo del suelo ($F=194.05$ $<p<0.001$).

La biomasa microbiana (BM) varió con el uso del suelo ($F= 2698.63$ y $p < 0.001$). El suelo de BN presenta el promedio más alto de BM, seguido por PN y el CF. La BM varió significativamente con el tiempo ($F=195.78$, $p<0.001$) (Figura 12) y con la interacción uso por tiempo ($F=392.25$, $p<0.001$). La BM fue mayor en BN que PN y CF para los meses de septiembre y noviembre de 2012, esta condición para BN y PN fue estadísticamente similar.

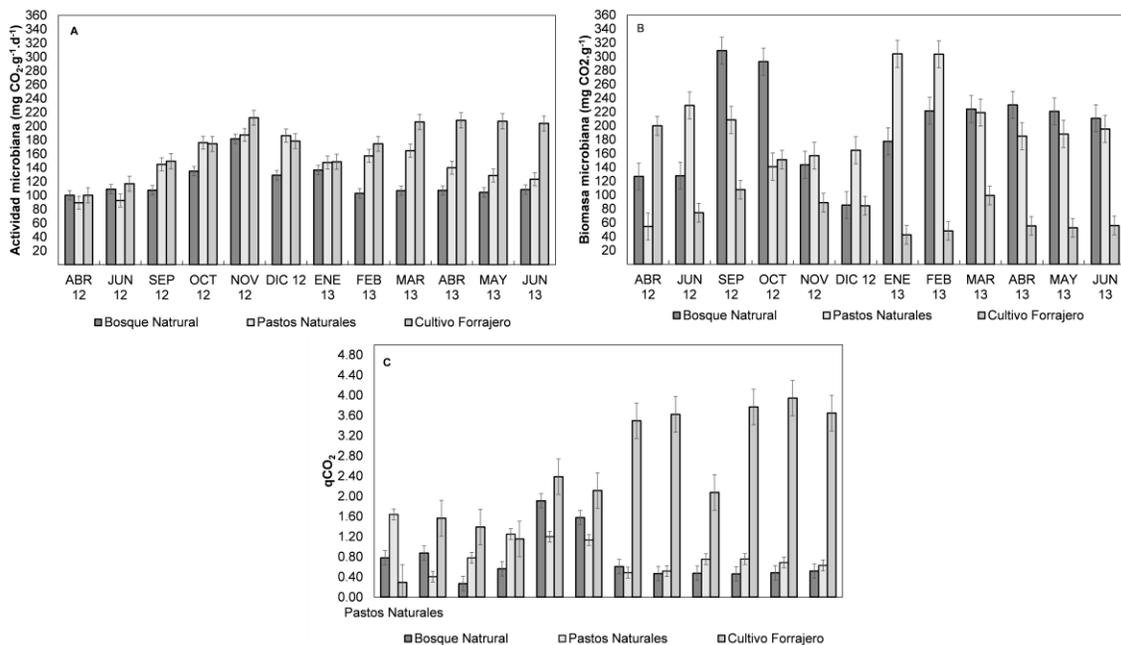


Figura 12. Características de las propiedades biológicas del suelo durante el tiempo de estudio: A) Actividad microbiana, B) Biomasa microbiana C) Coeficiente metabólico comparado en tres de usos del suelo: bosque natural (BN), pastura natural (PN) y cultivo de forraje (CF).

El cociente metabólico (qCO_2), varió con el uso del suelo ($F=15148.62$, $p<0.001$); CF tiene el mayor promedio de qCO_2 , para PN y BN fue estadísticamente similar, varió significativamente con el tiempo ($F= 435.02$, $P<0.001$) (*Figura 12*) y con la interacción uso por manejo del suelo ($F= 784.45$, $P<0.001$). El suelo de CF reportó el mayor qCO_2 en todos los meses, con valores superiores durante todo el 2013. El suelo de PN registró el mayor qCO_2 durante abril, octubre y diciembre de 2012, mientras el suelo de BN tiene el menor qCO_2 durante todo el estudio, con excepción de los meses abril, junio, noviembre 2012 y enero de 2013.

5.1. 4. Relaciones entre las variables suelo

En general, COT se correlaciona significativa y positivamente con AM, NT y relación C: N. Da se correlacionó negativamente con porcentaje de carbono orgánico SOC y pH. La relación C: N se correlacionó positivamente con el COT, AM y pH. La precipitación mensual se correlacionó positivamente con AM y HS (Anexo 1, Tabla 6).

5.1.5 Respiración en suelos (CO_2)

La respiración en el suelo de Bosque difiere significativamente del suelo de pastura y cultivo como lo muestra la prueba de ANOVA y la probabilidad respectivamente ($F= 207.96$ $p<0.001$). Existen diferencias significativas entre el comportamiento del CO_2 para los tres manejos (suelos de pastura natural (PN), cultivo de forraje (CF) y bosque natural (BN) respecto al comportamiento diario. En el bosque la respiración en la mañana difiere significativamente de la tarde y la noche ($F=11.20$ $p>0.001$), mientras la tarde y la noche no tienen diferencias significativas, los valores más altos están en la tarde $254.3 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ y la noche $280 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$. Las mayores variaciones entre los meses de muestreo se dan entre las mediciones de la tarde y la noche. El bosque presenta en promedio la mayor emisión de CO_2 mayor con $250 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$, seguido por la pastura con $230 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ y el cultivo $135 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$.

Para la pastura en la mañana y la tarde se emiten $181 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ y $200 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ respectivamente, sin encontrarse diferencias significativas, mientras los resultados difieren significativamente de las emisiones de CO_2 de la noche $283.5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$.

En el caso del cultivo no se observan diferencias significativas entre la mañana ($123.2 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$) y la tarde ($113,5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$), pero si con la noche $162 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$.

5.1.6 Aporte de material orgánico (entradas de carbono al sistema)

Carbono producido por el sistema (Hojarasca y raíces)

En el suelo del bosque (BN) en total se colectaron 7867 Kg ha^{-1} durante el periodo de estudio, lo que representa en promedio $655 \text{ Kg ha}^{-1} \text{ mes}^{-1}$, con un contenido de 37% de COT. Durante el mes de diciembre se colectó el de mayor volumen de hojarasca (2637 Kg.ha^{-1}). Para PN los datos utilizados en el modelo (aportes de raíces y hojarasca) fueron teóricos y se reportan en los valores de entrada. Para CF no se tuvieron en cuenta estos aportes, ya que el producto es cosechado.

Carbono orgánico fresco

En promedio se agregan 1000 Kg.ha^{-1} al momento de establecer el cultivo (CF), durante el mes de abril de 2012. Y en promedio se aporta boñiga durante el pastoreo en los meses de septiembre 2012 y febrero de 2013 (98.7 Kg ha^{-1})

5.1.7 Aporte de carbono por procesos hidrológicos

Balance hídrico bosque

La precipitación neta (PN) es la fracción de precipitación total que alcanza el suelo del bosque (TC+ EC) la cual fue 6.7%, la transcolación (TC) fue de 4,7% y la escorrentía cortical (EC) fue 2,0% (Burbano, 2013), se evidencia una relación $PT > TC > EC$. La interceptación (Precipitación-PN) del dosel fue de 93,3%. Las concentraciones de carbono varían de forma inversa $PN < T < EC$. Los flujos de C en Kg ha^{-1} son $PN=0.40$ $TC=0.89$, $EC=0.72$.

Del total de precipitación neta que entra (TC+EC) aproximadamente el $30\% \pm 19\%$ se está perdiendo en el suelo por escorrentía superficial y el resto se infiltra en el suelo. El flujo de C fue de $0.71 \text{ Kg C ha}^{-1}$, con concentración de carbono de $15,88 \text{ mg L}^{-1}$.

La precipitación y los volúmenes de TC, EC se correlacionan positiva y significativamente. De modo que los meses de mayor precipitación hubo mayor Precipitación neta.

Carbono en lluvia

La lluvia colectada tiene en promedio 4.9 mg COT L⁻¹ de, con un mínimo de 1.63 y un máximo de 7.1 mg L⁻¹. Los meses de mayor precipitación fueron los meses de abril, diciembre 2012 y mayo 2012, los de menor junio a septiembre de 2013 (Figura 13).

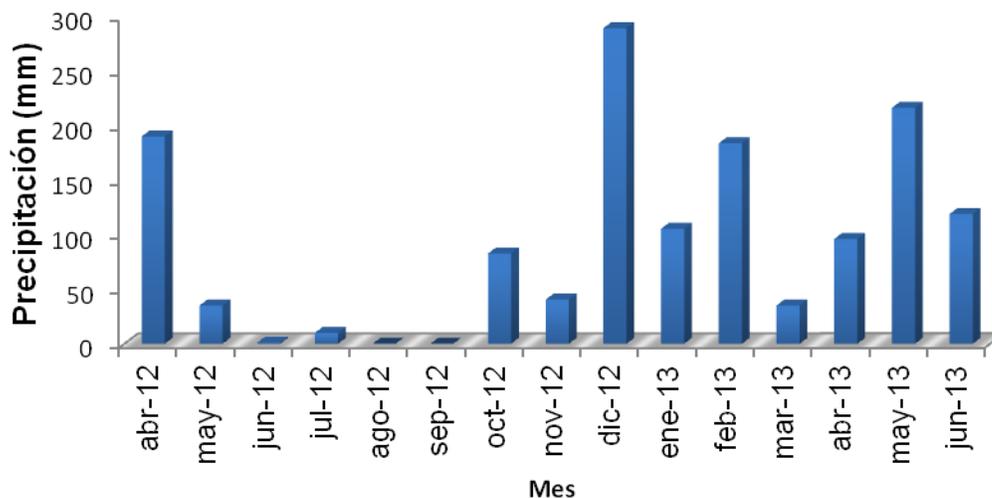


Figura 13. Precipitación en mm zona alta cuenca del Rio Las Piedras

Escorrentía superficial suelos agropecuarios

El flujo promedio en la escorrentía superficial del suelo de pastura fue de 0.23 Kg C ha⁻¹. Los meses de mayor flujo de COT (Kg C ha⁻¹) fueron diciembre 2012, enero y mayo de 2013, caracterizados por tener precipitaciones superiores a los 200 mm. En promedio las concentraciones de COT son 8.33 mg L⁻¹.

El flujo promedio en la escorrentía superficial del suelo de cultivo de forraje fue de 1,27 Kg ha⁻¹. Los valores mayores de escorrentía superficial fueron colectados en

los meses de diciembre 2012 y mayo de 2013, con concentración promedio de 9.77 mg COT L⁻¹.

5.2 Discusión

5.2.1 Análisis del uso del suelo y características físicas del suelo

Las tres usos del suelo bosque natural (BN), pastura natural (PN) y cultivo de forraje (CF) que se relaciona con manejos agrícolas, realizados por la comunidad de la parte alta de la cuenca, tienen efecto similar sobre las propiedades físicas. Los tres usos del suelo tienen óptima textura, Densidad Aparente y humedad higroscópica, consideradas características importantes de suelos ándicos. Por ejemplo, la densidad aparente (Da) no fue superior a 0,94 g cm⁻³, considerado como umbral crítico para el establecimiento de cultivos en suelos ándicos. La baja DA está asociada a la presencia de alofanos y al alto contenido de carbono orgánico (CO), demostrada por la correlación negativa y altamente significativa entre la Da y el CO (Cp= -0.538**) (Tabla 6). Dicha correlación explica además los cambios temporales de la Da, producto de la variación en la materia orgánica del suelo. Los meses en que ésta MO se incrementa, la Da disminuye (Dahlgren, *et al.*, 2004). Estos resultados concuerdan con Maturana, *et al.*,(2003) quienes sugieren una relación inversa entre la Da de los suelos y el contenido de materia orgánica. Las actividades de laboreo agrícola (arado, rotación de ganado, aplicación de abonos) pueden influir también en los cambios temporales de la Da y de la textura, por reacomodación de las partículas (Ingaramo, *et al.*, 2003), sin embargo, no ha sido alterada de forma negativa la Da de suelo. En relación a, la Humedad Higroscópica (HH) esta presenta una relación inversa (Cp=-0.511**) con la Da, entre mayor número de poros exista en el suelo habrá mayor volumen y mayor retención de agua dentro de sus partículas minerales (Dahlgren, *et al.*, 2004).

Los suelos de esta zona se caracterizan por ser fuertemente ácidos, típica característica de suelos de origen volcánico. El suelo del BN presentó acidez significativamente superior a los otros dos sistemas, probablemente en éste hay más producción de ácidos orgánicos y menor reciclaje de cationes (Dahlgren, *et al.*, 1991). El suelo de CF presenta acidez inferior a la del BN, explicada esta diferencia por el manejo realizado por la comunidad (comunicación personal), quien agrega compuestos cálcicos (Mg⁺⁺ o Ca⁺⁺) en forma de carbonatos (MgCO₃,

CaCO₃) y óxidos (MgO₂, CaO₂) con alto poder neutralizante de acidez proveniente de la calcinación de las rocas (calizas o dolomías). Estos resultados son similares a lo reportado por Tonneijck, *et al.*, (2010) y Dahlgren, *et al.*, (2004), donde la práctica de manejo más común para corrección de acidez y eliminación de toxicidad en suelos de origen volcánico es la agregación de compuestos cálcicos en forma de carbonatos y óxidos con alto poder neutralizante de acidez, fuente natural más económica usada para encalar. En el suelo de PN se apreció un incremento significativo en el valor del pH en función del tiempo, probablemente el aporte continuo de MO (estiércol) por el ganado, genera gradualmente moléculas altamente condensadas (sustancias húmicas)³ que producen este efecto, estos resultados coinciden con lo reportado por (Haynes, *et al.*, 1999), ya que no se reportó agregados cálcicos a este uso de suelo.

En conclusión las practicas agropecuarias realizadas por la comunidad no están alterando significativamente la estructura del suelo, concordando con Gamboa, *et al.*, 2011 quienes manifiestan que las características estructurales (Da, textura) de Andisoles les confieren resistencia al cambio de uso de suelo, además corroboran que las prácticas agrícolas realizadas son de bajo impacto y no están alterando las propiedades físicas.

5.2.2 Consecuencias del manejo del suelo sobre el almacenamiento de carbono

El promedio del Carbono orgánico Total (COT) almacenado en los manejos de PN, BN y CF fue de 123, 110 y 108 t ha⁻¹, respectivamente. Los valores de COT del presente estudio son dos veces superiores al COT en suelos andicos del Valle del Cauca, y en bosques húmedos de Costa Rica (Ibrahim, *et al.*, 2007), además triplica el valor reportado en suelos de tipo oxisol de Brasil y los llanos orientales colombianos (Fisher, Braz, *et al.*, 2007; Tonucci, *et al.*, 2011). La presencia de alófanos en estos suelos forma complejos órganominerales altamente estables con la materia orgánica impidiendo su fácil mineralización y permitiendo un alto potencial de almacenamiento de Carbono (Gamboa & Galicia, 2011) con menores emisiones de CO₂, una explicación radica en el historial de uso y manejo del

³ La materia húmica es una estructura supramolecular de moléculas bio-orgánicas de tamaño relativamente pequeño (con una masa molecular <1000), son los constituyentes principales del humus. Las moléculas húmicas se asocian entre ellas en conformaciones supramoleculares mediante interacciones hidrofobicas débiles a pH alcalino o neutro

suelo, que siendo extensivo, con rotación de ganado, aporte de materia orgánica fresca y madura, influye en el balance de carbono orgánico del mismo, aumentando la entrada y reduciendo la salida de carbono en el sistema. Esto es opuesto a los resultados reportados por Ibrahim, *et al.* (2007) quienes exponen que en cada uno de los paisajes ganaderos analizados las pasturas degradadas no están aportando significativamente al secuestro de carbono debido a su alto grado de degradación edáfica y escaso retorno de materia orgánica al suelo.

Las pasturas naturales (PN) presentaron valores más altos de COT, una razón que permite explicar dicha condición es la realización de una ganadería extensiva, con descanso en prolongados períodos de tiempo, esparcimiento de boñiga y nulo laboreo de la tierra, siendo esta una práctica cultural de las comunidades que habitan esta cuenca, tal condición permiten incrementar la entrada de MO al suelo y reducir las salidas.

Fisher *et al.*, (2007) estimó que la productividad de las pasturas en Colombia está entre 15 - 18 t ha⁻¹ anualmente y que la cantidad de mantillo existente es baja (0,8-1,5 t ha⁻¹), indicando que este se descompone rápidamente (vida media del mantillo de 22-33 días). En este estudio no se reportan datos de productividad, sin embargo, la concentración de N y el cociente C:N sugieren un aporte externo de N por la aplicación de urea, o probablemente por fijación simbiótica; nutrientes y materia orgánica son transferidos a través del excremento de ganado, ello incrementa la acumulación de materia orgánica en el suelo, estimulando el crecimiento de los pastos y por lo tanto incrementando la MO arriba y abajo del suelo (Haynes & Williams, 1999). Kong, *et al.*, (2005) y Thomsen, *et al.*, (2004) corroboran que el aporte de estiércol fresco puede incrementar el almacenamiento de carbono, compensando las pérdidas anuales que se reportan anualmente, encontrando relación lineal entre el incremento de material orgánico y el carbono almacenado, relación que depende de las tasas de descomposición del material orgánico. Estos resultados difieren de lo reportado por Ibrahim, *et al.*, (2007), quienes demostraron que las pasturas mejoradas (con entradas de material orgánico) no favorecen el incremento de carbono, puesto que no encontraron diferencias significativas entre pasturas mejoradas (81.3 t ha⁻¹ COT), degradadas (68.5 t ha⁻¹ COT) y pasturas con usos intensivos (63.25 t ha⁻¹ COT), permitiendo colegir que las pasturas degradadas o con uso intensivo no contribuyen al

almacenamiento de carbono, por el alto grado de degradación y pobre retorno de materia orgánica hacia el suelo.

A pesar del alto potencial de secuestro de carbono de los suelos en esta región, las tres prácticas de gestión difieren unas de otras en su potencial de almacenamiento de carbono. El suelo de BN almacenó menos carbono que la PN debido a que los procesos de ciclado de nutrientes son más lentos, su propio microclima hace que la materia orgánica permanezca por largo tiempo sin transformarse en el horizontes A_{00} (mantillo) del suelo. La relación entre el carbono de la hojarasca y el carbono del suelo es de 7:1 (36% a 5.2 %), adicionalmente este uso del suelo refleja las más altas pérdidas de CO_2 por respiración, esto producto del estado de madurez de esta cobertura. Echeverry (2012), reportó que el porcentaje de COT en la hojarasca es significativamente superior e indica la falta de mineralización en la misma zona de vida en que se desarrolla esta investigación. Ibrahim, *et al.*, (2007) indican como una característica común encontrar que el patrón de depósitos de carbono orgánico en distintos usos de la tierra es menor en suelos de bosques secundarios en edad avanzada que en suelos bajo pasturas, como ha sido encontrado en el presente estudio. La actividad agrícola conduce a la pérdida de carbono orgánico en rangos que van del 30%-50% debido a las bajos aportes de material orgánico en condiciones convencionales de cultivo y porque la tasa de pérdida de material húmico es mayor a la formación de humus. Sin embargo en el presente estudio, el COT almacenado en los suelos de cultivo de forraje es alto en comparación a otros cultivos, por lo tanto una gestión adecuada puede atenuar los efectos negativos potenciales de la agricultura.

5.2.3 Consecuencias del manejo del suelo sobre la actividad metabólica

Los tres manejos del suelo estudiados difieren de los procesos del carbono orgánico mediados biológicamente (actividad microbiana (AM), biomasa microbiana (BM) y el cociente metabólico (qCO_2). El cociente metabólico establece la relación entre la actividad microbiana y biomasa microbiana) y es uno de los indicadores de calidad del suelo que responde rápidamente a los cambios inducidos (Seybold, *et al.*, 1999). En el suelo de cultivo de forraje CF el qCO_2 es superior a $1 \mu gCg^{-1}$, sugiriendo un posible desbalance de la comunidad microbiana ocasionado por el manejo aplicado (Acuña, *et al.*, 2006), además en este sistema

se encontró la menor BM y mayor AM, reflejando una disminución de la eficiencia en la utilización de sustancias orgánicas del suelo por parte de la comunidad microbiana, la aplicación de materia orgánica madura (compost) implican un mayor consumo de energía por los microorganismos para procesarla (Paz, *et al.*, 2006) (*Figura 12*). En estudios anteriores este sistema reportó valores de qCO_2 inferiores a $1 \mu gCg^{-1}$ suelo, indicando además que el manejo progresivo y continuo está generando estrés al suelo (Echeverry, 2012). El suelo de PN y BN presentaron qCO_2 significativamente inferior que el del CF, reflejando menos intervención en estos sistemas. El suelo de PN tiene un incremento en el qCO_2 en comparación con Echeverry (2012), sin embargo, aún no supera los valores críticos que desencadenarían su desequilibrio. El suelo de BN es un terreno natural no intervenido y el PN es un suelo protegido por cubierta vegetal con labranza cero e intervención de pastoreo cada 2-3 meses. La fluctuación temporal en la actividad metabólica en el sistema de PN en algunos meses se debe probablemente a los aportes de urea por efecto de la excreción animal.

En contraste, en el sistema de BN, la cantidad y calidad de hojarasca altera el estado de sustancias y humedad para el crecimiento microbiano (Luo & Zhou, 2006a; Xu, *et al.*, 2006), dando como resultado menor valor de qCO_2 , cociente que debe disminuir progresivamente cuando el ecosistema no es perturbado y tiende al equilibrio (Doran, *et al.*, 1994). En este ecosistema se presenta la mayor biomasa microbiana e inferior actividad microbiana, posiblemente por la influencia del pH fuertemente ácido de este suelo, al igual que lo reportado en otros estudios realizados en bosques, según Bauhus, *et al.*, (1998), pero no se encontró relación positiva con el presente estudio.

5.2.4 Estacionalidad de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo

Las propiedades físicas y químicas de los tres sistemas presentaron cambios fluctuantes en el tiempo, pero no están asociados con la estacionalidad climática, mientras que la AM, BM y qCO_2 tuvieron cambios pronunciados con la estacionalidad, de allí que se encuentre una relación directa con la humedad del suelo y periodos de lluvia. En el suelo de bosque se apreció un incremento significativo de Carbono Orgánico en el mes de octubre en el cual empieza el

período de lluvias. Después de una época seca, en octubre se produce un aumento significativo del Carbono de la hojarasca y de la AM, lo que conduce a incrementos característicos de las relaciones C:N, tanto de suelo como de hojarasca, es plausible que esto estimula el trabajo de los microorganismos sobre la hojarasca para incrementar el aporte de CO al suelo en este mes. La estimulación de la AM por efecto de las lluvias facilitó la mineralización de la MO en suelos, reflejada en la disminución fuerte del CO en el mes de noviembre, manifestada con la disminución de la relación C: N tanto del suelo como de hojarasca. En los siguientes meses no se presentan cambios pronunciados en el CO de estos suelos, probablemente la disminución de lluvias impide un trabajo intenso de los microorganismos, lo que se refleja en la emisión de CO₂.

La baja variabilidad temporal de las propiedades físicas del suelo se asocian a 1) son características dominadas por la génesis de los suelos, y 2) Los Andosoles son suelos altamente resilientes (Gamboa & Galicia, 2011), por la estabilidad de su MO. Mientras la fluctuación de la AM está asociada a la precipitación de manera positiva y altamente significativa, (0.304**) (Tabla 6, Anexos), y el contenido de humedad del suelo. Pabst, *et al.*, (2013) reportan que una disminución en el contenido de agua del suelo durante la estación seca es responsable de la reducción de los flujos de CO₂ del suelo y la productividad de la biomasa en sistemas de altura. Después del re-humedecimiento de los suelos en el comienzo de la estación húmeda, a menudo, se muestran emisiones altas de CO₂ debido principalmente al aumento de la actividad microbiana.

5.2.5 Uso del suelo y emisiones de CO₂

Las diferencias entre los tres manejos del suelo, CF, PN, y BN se deben al tiempo en que la actividad lleva siendo realizada y al estado sucesional del sistema evaluado. En el caso del bosque este tiene mayor emisión debida probablemente a que se encuentra en un estado sucesional avanzado (maduro). A medida que los bosques alcanzan un estado clímax o de máximo desarrollo vegetativo, la producción primaria neta disminuye a razón de la elaboración de tejidos no fotosintéticos que requieren mayor respiración (Luo & Zhou, 2006a). Lo contrario ocurre en el sistema de cultivo, donde se refleja la menor respiración porque la fotosíntesis bruta supera la tasa de respiración (Producción neta) (Odum, 1972). Otra razón, es que existe un aporte de CO₂ producido a través de respiración de

las raíces, la cual está determinada por la biomasa las mismas y sus tasas de respiración, las cuales dependen de su producción. Por ello, el BN y PN presentan mayores respiraciones que CF. El resultado de emisión total de CO₂ del BN fue 91327 kg ha⁻¹ año⁻¹, considerada cercana a lo reportado para otros bosques tropicales (Tabla 3); seguida por las pasturas con 81475 kg ha⁻¹ año⁻¹ y el cultivo con 46408 kg ha⁻¹ año⁻¹. Los resultados reportados para este estudio pueden ser mayores debido a que las técnicas pasadas subestimaban en cierta forma las emisiones, y además porque la vegetación y el clima, son los factores críticos en la regulación de la variabilidad espacial de la respiración del suelo, y cambian a diferentes latitudes, disminuyendo desde las zonas ecuatoriales a los polos (Luo, *et al.*, 2006c).

La variación de la respiración durante las 24 H del día, normalmente es explicada por la correlación con la temperatura de la superficie del suelo, siendo mayor en la tarde que en la noche, a medida que baja la temperatura la actividad microbiana disminuye. La respiración se considera variable y dependiente del tiempo, debido a que los factores climáticos y de humedad del suelo varían a lo largo del día y entre meses, normalmente se espera correlación de la respiración con la temperatura del suelo. Sin embargo, en muchos casos y en este estudio no se correlaciona estadísticamente, probablemente debido a que otros parámetros abióticos como la humedad del suelo y la radiación fotosintéticamente activa tienen un impacto significativo sobre la respiración de los microorganismos y las raíces (Liu, *et al.*, 2006).

Tabla 3. Comparación de estudios de emisión CO₂ de suelos con diferentes coberturas

Tipo de bosque	Emisión Respiración	
	CO ₂ (Kg ha ⁻¹ ·año ⁻¹)	Autor
Bosque secundario tropical, Porce, Colombia	57600	(Ramirez Palacio, <i>et al.</i> , 2008),
Bosque primario tropical, Porce, Colombia	61200	(Ramirez Palacio & Moreno-H, 2008)
Bosque lluvioso de Brasil	74916	(Meir, <i>et al.</i> , 1966)
Bosque secundario tropical, Porce, Colombia	67788	(Moreno, <i>et al.</i> , 2008)

Pradera de pastos altos de Oklahoma en 2002 y 2003 respectivamente	8770 y 11310	(Zhou, <i>et al.</i> , 2006)
Praderas de Konza de Junio 1996 a Junio 1997	13500, 11000, 11200, 16000, 13000, 12000,	(Bremer, <i>et al.</i> , 1998; Knapp, <i>et al.</i> , 1998)
Pastura en Texas	10000, 21000 y 15000	(Mielnick, <i>et al.</i> , 2000)
Cultivo Nebraska	11550	(Amos, <i>et al.</i> , 2005)
Cultivo de soya Argentina	1160	(Alvarez, <i>et al.</i> , 1995)
Kikuyo Valle Cauca, Colombia	39200	(Gómez-Balanta, 2015)
Bosque Natural dominado por Roble	91327	Este estudio
Pastos Naturales (Kikuyo)	81475	Este estudio
Cultivos de Forraje (Maralfalfa)	46408	Este estudio

5.2.6 Aporte de material orgánico

Los resultados de hojarasca colectada en este estudio están dentro de los rangos de producción para bosques húmedos tropicales que pueden oscilar entre 7000 Kg y 15000 ton ha⁻¹ año⁻¹ de materia seca. Zapata-Duque, *et al.*, (2007) reportan que la producción de hojarasca puede ser comparable con bosques secundarios de Risaralda (2000 msnm) con 6150 Kg ha⁻¹ año⁻¹ (Gómez-Sarmiento, 2011), bosques de amazonas con 5700 ± 2200 Kg ha⁻¹ año⁻¹ (Valentini, *et al.*, 2008), bosques de roble en Antioquia (2400 msnm) con 7877 Kg ha⁻¹ año⁻¹ de hojarasca (Zapata-Duque, *et al.*, 2007) y Pitalito con 11000 Kg ha⁻¹ año⁻¹ de (Burgos-Nañez, 2015). Sin embargo, los valores son considerados bajos por Burgos-Nañez, (2015), puesto que bosques con las mismas características y con menor intervención al sur del macizo Colombiano tienen 11000 kg ha⁻¹ año⁻¹. Esto se puede explicar porque existe menor densidad de árboles por hectárea, coincidiendo con los resultados sobre la estructura de este bosque, el cual se caracteriza por intervención de tala selectiva, porque la mayoría de sus árboles se encuentran con DAP menores a 0.20 m, y pocos son los árboles DAP superiores a 0.59 cm.

Los principales aportes de hojarasca pertenecen a la especie *Quercus Humboldtii*, la especie dominante y con mayor Índice de Valor de Importancia (35.2%) (Rovis & Sarria, 2013). La hojarasca en promedio tiene 37.5% de carbono, cuya concentración fue relativamente constante, cercana a lo reportado por Ramírez-Correa, *et al.*, (2007), mientras la concentraciones de nitrógeno fueron mayores.

Al igual que Burgos-Nañez, (2015) se encontró variabilidad en los aportes mensuales de hojarasca, con el máximo valor de hojarasca antecedido y precedido por periodos de mayores precipitaciones (2637 Kg ha⁻¹), específicamente con la intensidad promedio de lluvia. Estos resultados se explican porque las precipitaciones pueden influir positivamente en la caída de material vegetal, debido al efecto mecánico que la lluvia puede ejercer sobre el bosque, ya que la lluvia siempre está acompañada por fuertes vientos, motivo por el cual se incrementa la producción de las diferentes fenofases de las especies, y también se debe a la genética de cada especie. Los robles son una especie caducifolia que elimina sus hojas como una estrategia para poder competir en un ecosistema de composición mixta; esta condición genera una alelopatía que impide que otras especies se desarrollen en sus alrededores. De esta manera se evita la competencia por nutrientes (Burgos-Nañez, 2015).

5.2.7 Aporte de carbono por procesos hidrológicos

La lluvia puede tener concentraciones de nutrientes como carbono, nitrógeno, sulfatos y fosfatos (Burbano-Garcés, *et al.*, 2014b; Burbano, 2013), sustancias que pueden retornar a la superficie químicamente transformadas por medio de proceso de deposición húmeda (partículas y gases lavados del aire) o deposición seca (partículas, gases y aerosoles). En este análisis las concentraciones de carbono (mg/L) se encuentran entre los rangos encontrados en otros estudios (Wang, *et al.*, 2004; Wilcke, *et al.*, 2001; Yuna, *et al.*, 2009).

La entrada de flujo de COT al sistema (BN, PN, CF) derivado de procesos hidrológicos es pequeño en comparación a los demás flujos del suelo (material orgánico, respiración, etc.), no obstante, juega un papel importante en la dinámica de la materia orgánica, en los procesos de formación del suelo, la meteorización de minerales y transporte de contaminantes. Es considerada una fracción lábil de la materia orgánica, disponible para los microorganismos, que puede intervenir en los procesos de humificación y mineralización de la materia orgánica.

Los resultados de los procesos hidrológicos en el BN coinciden con lo reportado en la literatura para otros bosques tropicales (Burbano-Garcés, *et al.*, 2014a; Cavelier, *et al.*, 1997; Veneklaas, 1990), reflejando que el volumen de transcolación es mayor a la escorrentía cortical, mientras que la relación entre concentraciones de carbono se incrementan de forma descendente desde Precipitación < transcolación < escorrentía cortical (Wang, *et al.*, 2004; Wilcke, *et al.*, 2001; Yuna, *et al.*, 2009). Los pocos estudios sobre lixiviados de hojarasca en los bosques montanos tropicales indican que las concentraciones de todos los nutrientes aumentan desde la precipitación al escurrimiento. En cuanto al flujo COT en la escorrentía superficial se encontró que es mayor en el bosque natural, seguido por el cultivo de forraje y la pastura natural. Estos resultados coinciden con los encontrados por Otero, *et al.*, (2011) en agro-ecosistemas de alta montaña, quienes concluyeron que la cobertura de pasturas protege el suelo, evitando la erosión y desplazamiento de partículas, y adicionalmente las raíces mejoran la porosidad y tasas de infiltración controlando la escorrentía; en tanto producto del laboreo y eliminación de cobertura en los cultivos, se deja al descubierto partículas de suelo que pueden ser arrastradas fácilmente por erosión hídrica. Por otro lado, el flujo de COT (Kg ha^{-1}) en BN, se debe a que las concentraciones de COT son mayores, el arrastre de carbono desde la copa de los árboles, tallo y hojarasca incrementa a medida que desciende al suelo (Guangcai, *et al.*, 2005). El proceso de arrastre de nutrientes depende de la intensidad de la precipitación, cobertura vegetal, pendiente, porosidad del suelo y vegetación y puede aportar a las fuentes hídricas como se ha reportado en estudios de la zona (Ordóñez-Díaz, *et al.*, 2013).

Capítulo 6.

Desarrollo del modelo de carbono

6.1. Modelo dinámico de carbono orgánico total en suelos andinos

Para la propuesta del modelo dinámico de COT en suelo, se consideró la revisión de literatura previa, los análisis experimentales de suelos y la información obtenida del análisis del sistema socio-ecológico, factores fundamentales para definir los elementos modelados para cada uso del suelo (entradas, salidas, reservorios y transformadores).

El modelo general de la dinámica de carbono orgánico desarrollado para suelo con diferente cobertura vegetal (Bosque natural (BN), pastura natural (PN) y cultivo de forraje (CF), se representó mediante tres reservorios, los cuales son simbolizados mediante el uso de una caja (stock-reservorio) en el software Stella® y representan los componentes de materia orgánica del suelo, los cuales están constituidos por una fracción de COT de acuerdo al diferente estado de consolidación; cada uno tiene flujos de entradas y salidas que los definen. Los reservorios corresponden a: 1) Carbono de residuos orgánicos C residuos (Mulch), 2) humus y 3) biomasa microbiana BM (considera los grupos funcionales expresados en Kg.ha⁻¹).

Los flujos de carbono entre cada reservorio están definidos por los procesos de humificación, mineralización y asimilación de carbono. Los procesos mencionados se presentan en mayor o menor medida dependiendo de la relación C/N del residuo que ingresa, siempre intentando llevar la relación C/N del material a rangos similares a los de los microorganismos, los cuales son igualmente aproximados a la relación C/N del suelo (10-11). Para el caso de materiales con

una relación C/N superior a la del suelo ($C/N > 25$), los microorganismos tendrán una mayor cantidad de carbono disponible, por lo que se incrementará su actividad microbiana para descomponer el residuo, teniendo como consecuencia un incremento en la formación de metabolitos y liberación de CO_2 . Igualmente, al haber mayor cantidad de carbono en el material que ingresa, se presentará una mayor asimilación de carbono para crecimiento de tejido celular, dinámica que se encuentra representada en el modelo por el flujo desde el reservorio de mulch al BM y por la respiración. Por el contrario, si la relación C/N del material que ingresa es baja ($C/N < 10$), los microorganismos tendrán una mayor disponibilidad de nitrógeno, ocasionándose una intensa mineralización, lo que conllevaría a superar la capacidad del N que pueda ser absorbido por las plantas, por lo tanto puede haber lavado del nitrógeno en forma de nitrato excedente por las aguas percolantes, contaminando la capa freática (Gallardo, 2012). Los residuos con C/N menores a 10 también pueden alterar la existencia de carbono del suelo, ya que los microorganismos al requerir de mayor energía (C), deberán obtenerlo del carbono disponible en el suelo. La relación C/N se ha establecido como condicional en el modelo, para determinar los procesos de mineralización, humificación y asimilación, debido a que está relacionada con la velocidad de descomposición del material orgánico aportado.

La dinámica representada, considera las entradas de carbono que pueden ser aportadas por el mismo sistema como hojarasca, raíces o según el manejo dado al suelo: Material orgánico fresco o maduro (desechos de cosecha, boñiga, abono orgánico). Como variables de salida se tiene la respiración y la escorrentía superficial del suelo; la respiración en este caso fue modelada comparando con los datos experimentales de actividad microbiana y respiración del suelo ($Kg\ C\ ha^{-1}\ mes^{-1}$). Los almacenamientos (reservorios) de carbono orgánico total en el sistema (Biomasa microbiana, humus y residuos de carbono (mulch)) están conectados mediante procesos biológicos que corresponden a la humificación, asimilación y decaimiento de microorganismos. El sistema fue parametrizado y calibrado mediante las fracciones de humificación (Fh) y respiración (Fr), así como con las tasas que afectan los flujos: Tasa de asimilación (Ka), tasa de decaimiento de la biomasa microbiana (Kd), descomposición del material orgánico (k_1 y k_2), soportadas en la revisión de literatura, por tasas identificadas en ecosistemas equivalentes que difieren según el material aportado y el uso del suelo.

Las variables fisicoquímicas del suelo (textura, densidad aparente y pH) no fueron incluidas en los modelos de almacenamiento de carbono, dado que no se presentó variación al interior de cada uno (CF, PN, BN,), para la temporalidad estudiada.

A pesar de que se conoce la relación explícita del efecto de la temperatura en los procesos biológicos, en los datos analizados no se logró determinar dicha relación, quizás, debido a que las mediciones en campo no permiten aislar los efectos de variables específicas, y la periodicidad de las mediciones (mensual) no permitieron identificar variación significativa.

6.1.1 Modelo Matemático

El balance de masa de carbono. Se desarrolló el balance de masa para cada uno de los reservorios (residuos de carbono, humus y biomasa microbiana) a través de los procesos de entrada, salida y acumulación. Los modelos están determinados por ecuaciones diferenciales en derivadas parciales inmersas en el software Stella®. Cada ecuación describe el balance de masa de carbono orgánico en cada uno de los almacenamientos. En Tabla la 4 se presenta la abreviación de los parámetros representados en los procesos de balance del modelo de carbono orgánico total en el PN, BN CF, y las unidades de trabajo.

Tabla 4. Abreviación de los parámetros para el modelo de carbono en los tres suelos

Abreviación	Definición	Unidades
BM	Stock de COT biomasa microbiana	Kg ha ⁻¹
CO Residuos	Carbono de residuos orgánicos	Kg ha ⁻¹
Humus	Humus	Kg ha ⁻¹
F AO	Flujo de aporte orgánico	Kg ha ⁻¹ . mes ⁻¹
RH C RO	Flujo de respiración carbono orgánico de residuos	Kg ha ⁻¹ . mes ⁻¹
Flujo H	Flujo de humificación	Kg ha ⁻¹ . mes ⁻¹

RH	Flujo de respiración humus	Kg ha ⁻¹ . mes ⁻¹
Flujo ASM	Flujo de asimilación	Kg ha ⁻¹ . mes ⁻¹
Flujo D	Flujo decaimiento BM	Kg ha ⁻¹ . mes ⁻¹
Flujo ASM 2	Flujo asimilación secundaria	Kg ha ⁻¹ . mes ⁻¹
K	Tasa de descomposición residuos	mes ⁻¹
K1	Tasa de asimilación	mes ⁻¹
K2	Tasa de descomposición de humus	mes ⁻¹
Fh	Fracción de humificación	adimensional
Fr	Fracción de respiración	adimensional
Kd	Tasa de decaimiento BM	mes ⁻¹
P	Precipitación mensual	Mm
CLL	Flujo de carbono en lluvia	Kg ha ⁻¹ . mes ⁻¹
C	Concentración de carbono en la lluvia	Kg L ⁻¹
Volumen	Volumen de lluvia	L ha ⁻¹
Esc S	Escorrentía superficial	Kg ha ⁻¹
Pc	Carbono Transcolación	Kg ha ⁻¹
DEC	CL*K	Kg ha ⁻¹ . mes ⁻¹
DEC1	CL*K1	Kg ha ⁻¹ . mes ⁻¹
DEC2	Humus*K2	Kg ha ⁻¹ . mes ⁻¹
ESC	Carbono Escorrentía cortical	Kg ha ⁻¹
Esc S	Carbono Escorrentía superficial	Kg ha ⁻¹
CN entradas	Relación C:N residuos	adimensional

A continuación, se desarrollan las ecuaciones que describen los balances de masa:

$$CO_{mulch}(t) = CO_{mulch}(t - dt) + (Flujo_{PR} + CLL - Flujo_H - Flujo_{INM} - Esc_S - RHCL) * dt$$

(1)

La ecuación que describe la transformación de carbono de residuos orgánicos (CO) (2) está determinada por los flujos de entrada de carbono de Residuos

orgánicos (PN= estiércol, hojarasca; CF= Abono orgánico; BN= residuos orgánicos como: hojas, frutos, ramas y restos de organismos regulado por la dinámica de producción de biomasa vegetal) y de la entrada de carbono mediante la lluvia (C LL), regulada por la concentración de carbono y el volumen de lluvia; en el caso del BN, regulada por los procesos de translocación y percolación realizados a través de la vegetación. Las salidas están determinadas por los flujos de carbono de los procesos de humificación, mineralización y asimilación del carbono de los residuos orgánicos, realizada por los microorganismos y regulada por la calidad y cantidad del material aportado que determina la velocidad de mineralización y formación de humus. También se consideran pérdidas por el flujo de carbono que sale por escorrentía superficial.

$$\mathbf{Humus(t) = Humus(t - dt) + (Flujo_H + Flujo_D - Flujo_MIN2 - RHp) * dt \quad (2)}$$

La ecuación general de humus (2) es una ecuación diferencial, donde el comportamiento temporal del humus depende de la entrada de dos flujos: 1) flujo de humificación de residuos (PN el aportado por la hojarasca, raíces y el estiércol, CF de los aportes del abono orgánico, y BN hojarasca, frutos, tallos), regulado por la fracción de humificación (Hum) y tasa de descomposición, que dependen de la relación C:N. 2) el flujo del decaimiento de la biomasa microbiana. Los flujos de salida están determinados por: la tasa de mineralización secundaria (k2), representada por medio de la pérdida de CO2, y la pérdida de C a través de la asimilación de los microorganismos.

$$\mathbf{BM(t) = BM(t - dt) + (Flujo_ASM + Flujo_MIN2 - Flujo_D) * dt \quad (3)}$$

La ecuación que describe el almacenamiento (Reservorio) de carbono en la biomasa microbiana (BM) está determinada por dos flujos de entrada, correspondientes a los procesos de asimilación, proveniente de los reservorios de carbono orgánico de los residuos y humus, los cuales están regulados por las tasas de descomposición y la fracción de asimilación correspondiente a cada proceso. El flujo de salida corresponde a la muerte de microorganismos regulada por una tasa de decaimiento (Kd).

Parametrización. Se definieron los valores de los parámetros cinéticos que se presentan en la Tabla 5, los cuales fueron obtenidos de la revisión de literatura y

de datos medidos en campo. Seguidamente a la parametrización, se representó el modelo en el Software Stella® para cada uso del suelo con los reservorios, flujos y convertidores descritos en la Tabla 4. Se integraron al modelo las ecuaciones matemáticas que representaron los procesos de transformación de COT (Modelo Matemático), las correlaciones y las tasas de cambio de las variables.

Tabla 5. Parámetros del modelo de carbono para los tres usos del suelo

Manejo	Parámetro	Rango	Calibración	Referencia
CF	K	0.01-0.9 mes ⁻¹	0.07	(Eusufzai, et al., 2013; Soltner, 1990) y el autor
	K2	0 – 1 e-5 mes ⁻¹	2.2 E-04	(FAO, 1992)
	Fr	0.2-0.8	0.67	(Aguilar-J, et al., 2011) y el autor
	Fh	0.25-0.50	0.25	(Aguilar-J, et al., 2011; Bravo Realpe, et al., 2014)
	Kd	0.2-1.2 mes ⁻¹	0,2 mes-1	(Fu, et al., 2000; Huang, et al., 2010)y este estudio
PN	K	0.008-0.78 mes ⁻¹	0.1	(Antil, et al., 2011; Bertora, et al., 2009; Sánchez-Cárdenas, et al., 2007; Sandoval-Arriola, 2006; Trujillo, et al., 2006)
	K2	0 – 1 e-5 mes ⁻¹	3 E-3	(FAO, 1992)
	Fr	0.6-0.8	0.75	(Aguilar-J, et al., 2011; Bertora, et al., 2009)
	Fh	0.25-0.50	0.2	(Aguilar-J, et al., 2011; Bertora, et al., 2009; Bravo Realpe, et al., 2014)
	Kd	0.1-1.2 mes ⁻¹	0.1 mes ⁻¹	(Fu, et al., 2000; Huang, et al., 2010)

Continuación Tabla 5

Manejo	Parámetro	Rango	Calibración	Referencia
BN	K2	0-0.5.4E -6	1.00E-05	(FAO, 1992)
	K	0.001-0.12 mes ⁻¹	0.12	(Salinas, et al., 2011; Sollins, et al., 1987; Zapata Duque, et al., 2007)
	Fr	0.6-0.8	0.75	(Aguilar-J, et al., 2011)
	Fh	0.25-0.50	0.2	(Aguilar-J, et al., 2011; Bravo Realpe, et al., 2014)
	Kd	0.9-1.8 mes ⁻¹	0.18	(Fu, et al., 2000; Huang, et al., 2010) y el autor

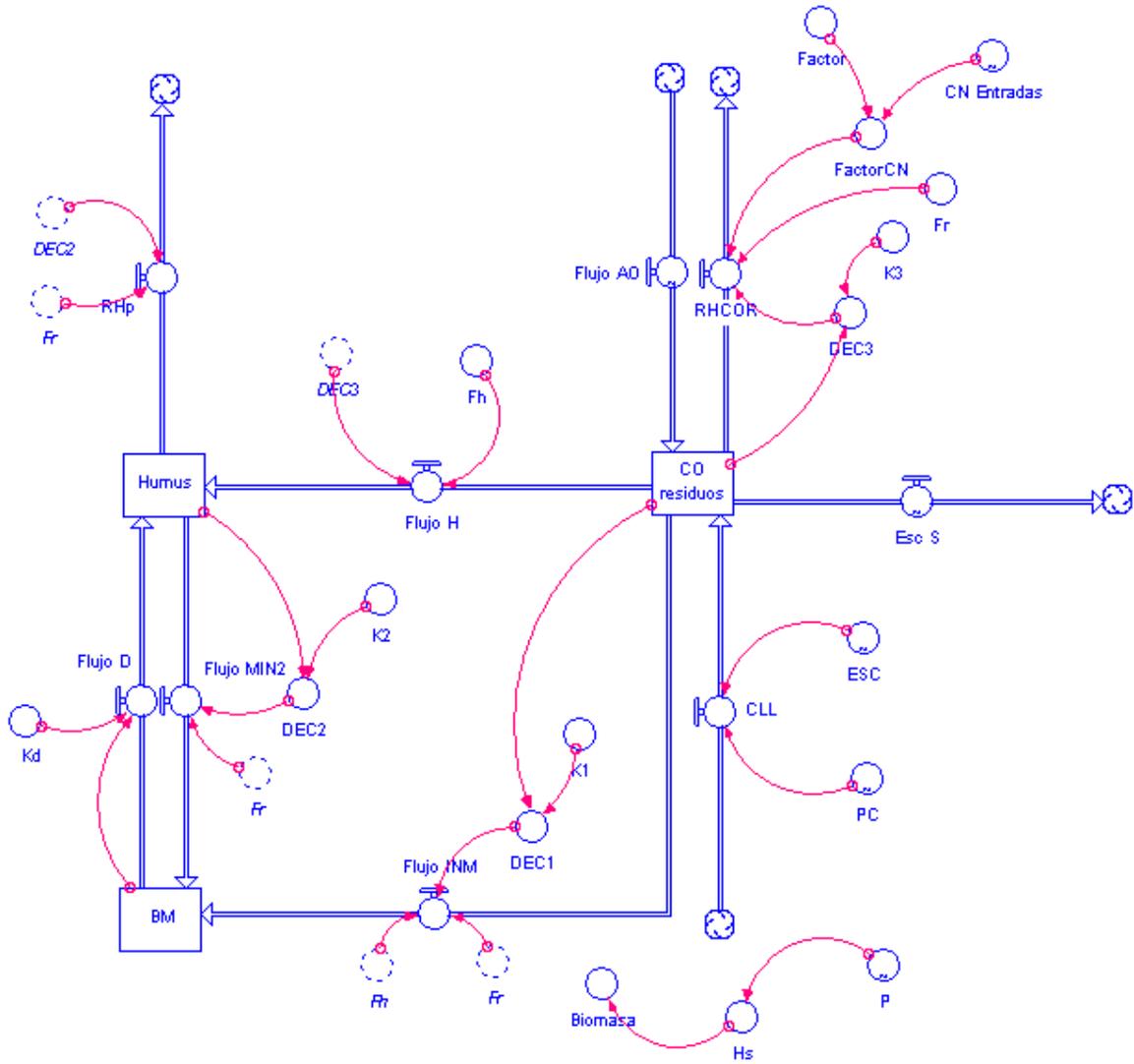


Figura 14. Representación del modelo general de almacenamiento carbono BN en el software Stella®

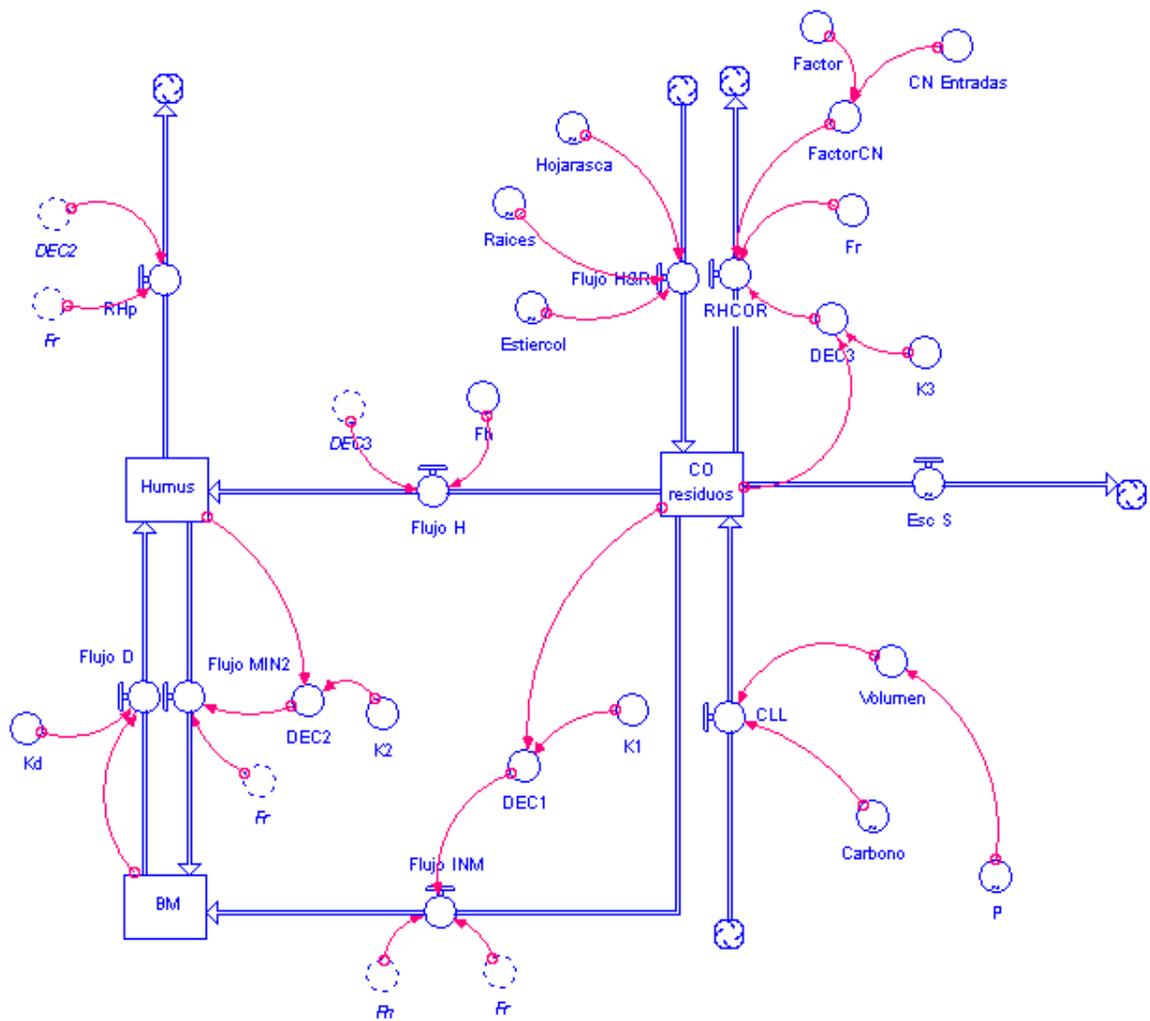


Figura 15. Representación del modelo general de almacenamiento carbono PN en el software Stella®

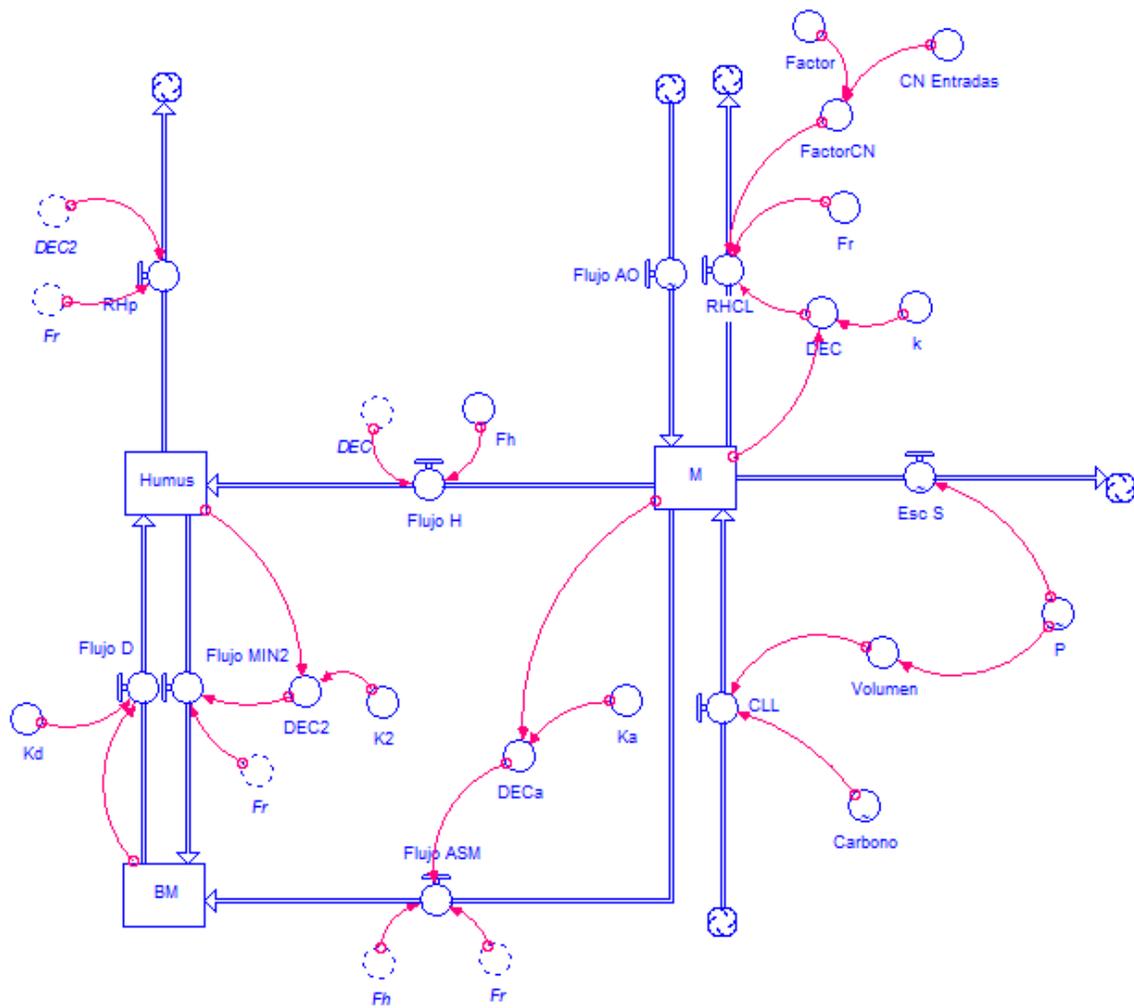


Figura 16. Representación del modelo general de almacenamiento carbono CF en el software Stella®

6.1.2 Calibración del modelo

Los valores de los parámetros cinéticos definidos en la parametrización se entregan en la Tabla 5 (columna calibración). Se aplicó una prueba de sensibilidad para definir cuáles son los parámetros que más afectan el comportamiento del modelo, los cuales son los primeros en calibrarse. Los parámetros se calibraron según el mejor ajuste a los datos reales mediante la ejecución de corridas variando los parámetros hasta obtener una correlación (R^2) mayor a 0.6, cuando

se obtuvo el mejor ajuste de los datos finalizó el proceso de calibración, obteniéndose los parámetros definitivos del modelo. El método matemático utilizado por el software para las corridas del modelo fue Runge Kutta 4 (procedimiento de integración numérica para resolver ecuaciones diferenciales ordinarias (EDO) a partir de un valor inicial dado).

6.1.3 Verificación del Modelo

La verificación del modelo se realizó comparando los datos modelados mediante el software Stella® y los datos cuantificados en la parcela 2 de CF, PN, BN mediante un análisis de correlación simple realizado en software RWizard (Guisande, *et al.*, 2014). Para CF el coeficiente de correlación fue de 0.85, con un coeficiente de determinación 0.73, y un R^2 ajustado de 0.71. Los datos del modelo cumplen con la distribución normal $p > 0.05$. El análisis de comparación de medias con la T pareada demuestran que existe suficiente evidencia para aceptar la hipótesis de igualdad de medias, siendo los resultados de los datos modelados y experimentales estadísticamente iguales para el periodo de estudio. ($t = -1.4$, $p < 0.05$).

Para la PN, el coeficiente de correlación múltiple obtenido para los resultados del modelo de COT y los datos medidos experimentalmente, fue de 0.89, con un coeficiente de determinación 0.80, R^2 ajustado 0.78. Los datos del modelo cumplen con la distribución normal $p > 0.05$. El análisis de comparación de medias con la T pareada, demuestran que existe suficiente evidencia para aceptar la hipótesis de igualdad de medias, siendo los resultados de los datos modelados y experimentales estadísticamente iguales para el periodo de estudio. ($t = 2.18$, $p < 0.05$).

Para la BN, el coeficiente de correlación múltiple obtenido para los resultados del modelo de COT y los datos medidos experimentalmente fue de 0.78, con un coeficiente de determinación 0.60, y R^2 ajustado 0.54. Estos resultados se deben a que el suelo de BN tiene varios ingresos de carbono adicionales, como la biomasa de raíces, troncos y salidas por respiración de las mismas, que no fue posible explicar con los datos recopilados. Los datos del modelo cumplen con la distribución normal $p > 0.05$. Pese al bajo coeficiente de determinación, la prueba de T pareada, demuestra que existe evidencia para aceptar la hipótesis de

igualdad de medias, siendo los resultados de los datos modelados y experimentales estadísticamente iguales para el periodo de estudio. ($t= 2.25$, $p < 0.05$).

6.2 Análisis de la dinámica de almacenamiento de carbono

El modelo explica cómo sucede la dinámica del carbono orgánico del suelo en el periodo estudiado (12 meses) para un rango de precipitación de 14 a 280 mm. Durante este periodo el COT del suelo para los tres usos, evidenció un comportamiento dinámico, debido a las fluctuaciones del reservorio de carbono orgánico de los residuos que comprende entre 17-20% del COT del suelo (Mulch), este es afectado por las entradas de material orgánico (Hojarasca, raíces, troncos, abonos orgánicos, estiércol vacuno) y las salidas de carbono orgánico del suelo en forma de CO_2 por los procesos de mineralización (C equivalente en el modelo), representadas entre el 0.7-1.2% del COT del suelo.

Las entradas de material orgánico en cantidad, periodicidad, y con diferentes tasas de descomposición (rápida y lenta descomposición), son las principales características que afectan de manera directa el almacenamiento de carbono en los suelos. En los análisis realizados se identificó que en el caso de la PN existieron ganancias de COT en el periodo estudiado, en el BN persiste un comportamiento constante, con algunas variaciones de baja magnitud. Y en el CF, se observa un leve incremento al iniciar el periodo, debido a los aportes de materia orgánica al sistema, pero, este vuelve a disminuir debido a que no se realiza ningún aporte durante un periodo de tiempo prolongado. El comportamiento diferente en la PN, puede atribuirse a que cuenta con varias entradas aleatorias de material orgánico con diferentes tasas de descomposición, como son la necromasa de las raíces, hojas y estiércol vacuno. Adicionalmente, este suelo no tiene intervenciones de tipo antropogénico intensivo. En congruencia con Ibrahim, et al.,(2007), las pasturas de este tipo, incorporan mayores cantidades de materia orgánica en la superficie del suelo que otros usos del suelo; al estar cubiertos por pasturas perennes obtienen la mayor fuente de carbono de la productividad primaria neta (PPN), realizada por debajo de la superficie del suelo, siendo de gran importancia la senescencia y recambio de las raíces de las plantas (Fisher, Santos, et al., 2007; Trujillo, et al., 2006). En la mayoría de los sistemas de pastoreo, el principal mecanismo para depositar C a una profundidad más allá de

los primeros centímetros es a través de la producción de las raíces, la mortalidad y la descomposición. Es por ello que la evaluación de la producción de raíces y la descomposición debe ser un componente clave en la comprensión de la dinámica de C en el suelo (Ibrahim, et al., 2007). Adicionalmente, las pasturas perennes pueden mejorar su adaptación a factores climáticos, edáficos y bióticos (enfermedades), con mayor tolerancia al pastoreo, como consecuencia de un mayor desarrollo de raíces, lo que incrementa la relación tallo-raíz que está directamente relacionada con la PPN y por tanto con la capacidad de inmovilización de carbono y absorción de agua. De esta forma, durante la estación seca las pasturas invierten más en sus sistemas radicales y menos en sus brotes aéreos, con ello disminuye la evapotranspiración y aumenta el consumo de agua, pudiendo contribuir con la almacenamiento de carbono (Botero Botero, 2000) teniendo mayor eficacia para reducir la acidificación del suelo (Chan, et al., 2010). Situación que concuerda con los resultados obtenidos de pH en el suelo de pastura, los cuales fueron más altos (5.38) que en el sistema BN (4.68).

Los reservorios de carbono orgánico de los residuos y biomasa microbiana son controlados por los aportes de forma natural (hojarasca y raíces), por actividades agropecuarias (abono orgánico y estiércol de vacuno) y por las condiciones climáticas, mientras el reservorio de humus es afectado por la mineralización secundaria (K₂), aunque en menor medida (Zambrano, et al., 2004). En Andisoles, la presencia de alofanos y los altos contenidos de arcillas, disminuyen las tasas de K₂ (Sánchez, 1981). En consecuencia, los principales cambios en la dinámica del COT del suelo suceden en los reservorios de carbono orgánico de del mulch y de la biomasa microbiana. Los flujos de entrada de carbono orgánico por la lluvia y de salida por escorrentía superficial fueron tenidos en cuenta para el desarrollo del modelo, sin embargo, no fueron significativos en la dinámica del COT de los tres usos del suelo, puesto que representan flujos menores al 0.1%.

Acorde con la literatura las tasas de descomposición de la hojarasca y raíces del PN y BN son mayores a las del compost ($k=0.07$, $k=0.1$, $k=0.12$, respectivamente), y se asocia principalmente con la relación C/N del residuo aportado (BN:25, PN: 25 y CF:12-15), y con su composición química, factor que determina la actividad de las comunidades microbianas (Blair, et al., 1990; Loaiza-Usuga, et al., 2013). De esta forma, en los suelos de PN y BN existe mayor descomposición de carbono representado en mayores emisiones de CO₂; puesto que la biomasa

microbiana debe trabajar más para su degradación, hasta llevar el material orgánico que ingresa a una relación C/N aproximada de 10 -12. Adicionalmente en estos dos sistemas se presenta una mayor producción de raíces, que también aportan CO₂ (Luo & Zhou, 2006c). La adición de abonos orgánicos busca el aporte suficiente carbono y nutrientes, para que mediante procesos de mineralización puedan ser absorbidos por las plantas, y además contribuyan a mejorar las condiciones físico-químicas y biológicas del suelo, favoreciendo la formación de sustancias húmicas; como consecuencia se busca incrementar la fertilidad al suelo (Dominati, *et al.*, 2010). En el caso CF la emisión de CO₂ fue menor debido a que hay menor aporte de material orgánico.

En relación al reservorio de la biomasa microbiana, en la PN y BN el comportamiento refleja un incremento (PN:116-232 Kg C ha⁻¹; BN 284 a 387 bajando a 374 Kg C ha⁻¹). En el BN este incremento posiblemente a que existió un incremento en la defoliación de la vegetación. En estos dos suelos se forma un mantillo que protege a los suelos de la temperatura y la humedad (León, *et al.*, 2011), siendo de importancia el papel que tiene en la nutrición vegetal, principalmente del tiempo de retorno del nutrientes al suelo (Weerakkody, *et al.*, 2006). En el caso de CF se observa un incremento de la BM cuando se agrega abono orgánico, en este periodo predomina el proceso de mineralización, liberándose nitrógeno que es consumido por las plantas (ACTAF, 2016), sin embargo, la BM decrece al finalizar el periodo estudiado (107 a 94 Kg C ha⁻¹). Esto se explica porque el aporte de abono orgánico se realizó únicamente durante el primer periodo de medición, evidenciando que no es suficiente el aporte al sistema para que los microorganismos se mantengan en el rango óptimo sin que predomine la tasa de decaimiento. La adición de abonos orgánicos produce una explosión microbiana temporal que incrementa la mineralización en el sistema, después ocurre una disminución tanto de la actividad microbiana como del contenido de materia orgánica del suelo hasta que nuevamente se alcance el equilibrio; dependiendo del grado de humificación del material añadido, la acción residual se extenderá más o menos en el tiempo. Adicionalmente, en el suelo de CF, hay pérdida COT en la escorrentía superficial, puesto que está descubierto por procesos de arado y remoción de arvenses, por lo tanto, tienen potencial de pérdida de carbono por lavado en eventos de precipitación, siendo mayor el flujo COT de salida del sistema por escorrentía superficial (36, 5 litros en escorrentía superficial con 9.71 mg L⁻¹ de COT) en comparación con PN y BN. En el largo

plazo esta podría contribuir con la degradación del suelo (Jackson, *et al.*, 2003). En consecuencia, el suelo de CF es susceptible a la erosión hídrica, ya que la lluvia tiene efecto a través del impacto de las gotas de agua sobre la superficie del suelo, provocando el transporte de partículas por aspersion. El proceso de degradación del suelo es gradual y puede ocurrir en varias etapas, inicialmente sin que el agricultor lo perciba y el rendimiento de los cultivos se mantenga estable por la aplicación normal de fertilizantes y de enmiendas, proceso que en el momento está sucediendo en la zona. Además, en este sistema se evidenció que los microorganismos tienen un alto coeficiente metabólico, que repercute en una mayor actividad de la biomasa microbiana, resultado inverso al BN.

Las emisiones de CO₂ del suelo de bosque natural (BN) fueron superiores a las producidas en pastos naturales (PN) y en el cultivo de forraje (CF) (BN 137-350; PN 117-266; CF 83-147 Kg CO₂ ha⁻¹ día⁻¹), resultado de las constantes y mayores entradas de material orgánico, las cuales son mineralizadas por los microorganismos.

El flujo de CO₂ es variable en los tres sistemas, se ha encontrado que puede variar considerablemente de un año a otro, principalmente en función de la precipitación y humedad del suelo (CCA, 2014).

6.3 Análisis del servicio de almacenamiento carbono y las comunidades andinas

La gestión del carbono en los ecosistemas es de interés no solo por el almacenamiento de carbono en suelos, sino porque su acumulación y ciclado contribuyen a la fertilidad del suelo. El mayor porcentaje de la composición de la materia orgánica es carbono orgánico, el cual está asociado a la formación de complejos húmicos que mejoran la estructura y estabilidad de los suelos, incrementando la retención de agua y resistencia a la erosión. Además, puede optimizar la dinámica de ciclado de nutrientes disponibles para las plantas.

La formación de humus en el suelo, o el carbono orgánico estable (protegido) está asociada a la calidad del suelo, y requiere para su formación que los aportes de material orgánico (hojarasca, boñiga, abono, etc.) sean descompuestos a tasas moderadas que permitan la proporción entre la humificación y la mineralización.

De esta forma se asegura que en el suelo perdure la estructura física (complejo arcillo-húmico, humedad del suelo, densidad aparente), química (pH, C/N, P) y biológica (BMS y AM), adecuadas para mantener los procesos y funciones del suelo, garantizando la producción agrícola.

Es conocido que las actividades agropecuarias tienen potencial de afectar las reservas de COT, como se ha comprobado en el suelo de cultivo de forraje, que a pesar de que en el momento no se evidencia pérdidas significativas, la BM microbiana, el coeficiente metabólico y la escorrentía superficial puede llevar a la degradación del suelo, el carbono en el suelo podría llevar a pérdidas importantes de las propiedades físico-químicas y biológicas, representando amenazas para los sistemas de producción agrícola y seguridad alimentaria. Sin embargo, los manejos agropecuarios con menor impacto tienen el potencial de almacenar carbono y en consecuencia mejorar la calidad del suelo, como la PN, que tiene actividad antrópica no intensiva, puesto que el pastoreo ocurre entre periodos, no hay arado, ni quemados, y adicionalmente cuenta con entradas aleatorias de material orgánico.

Mejorar el almacenamiento de COS en estos suelos depende de mejorar las prácticas agropecuarias de la zona, principalmente las realizadas para el establecimiento de cultivos. Por ello, las prácticas deberían estar encaminadas a mantener el equilibrio entre los procesos de mineralización y humificación, a partir de cambiar las prácticas de labranza, mediante siembra directa, sin voltear la tierra; y manteniendo los rastrojos en la superficie del suelo, así se evita o minimiza una fuerte mineralización de la materia orgánica (emisión de CO₂) con la subsecuente formación de nitratos. Con esta práctica no hay impacto sobre las comunidades de macrofauna que controlan en parte la descomposición realizada por la biomasa microbiana y favorecen la formación de agregados biogénicos. Además mantienen la temperatura, aireación y humedad estables y podrían ser el sustrato del cual se nutrirán los microorganismos, haciendo que exista un equilibrio de sus poblaciones similar a lo que ocurre en ambientes naturales (Lorenzatti, 2003).

Adicionalmente, es necesario que se optimicen los insumos agronómicos (fertilizantes y enclados), controlando las condiciones de los abonos orgánicos agregados y preparados basados en los análisis de suelos, que determinan la

correcta cantidad de fertilizante a agregar. Es importante que se realice tratamiento de escorrentía, sobre todo en las mayores pendientes, mediante la construcción de zanjas de ladera o siembras al contorno (nivel), con barreras vegetativas, desagües protegidos con vegetación, franjas de amortiguamiento o fajas de vegetación y cultivos cobertores. Lo anterior, con la finalidad de reducir la escorrentía superficial y acumulación excesiva de agua, evitando la erosión; además la vegetación ayuda a infiltrar la escorrentía, manteniendo las estructuras y los alrededores secos. Por último, se podrían incluir modelos agropecuarios diversificados, mediante la combinación de cultivos transitorios y no transitorios, así como, con la siembra de árboles fijadores de nitrógeno y CO₂, rotando cultivos (leguminosas, avena, ryegrass); de esta forma se protege el suelo y se evita el agotamiento, asegurando un adecuado ciclado de nutrientes (Altieri, 2011b). El adoptar las medidas antes mencionadas traería beneficios para la producción agropecuaria sostenible de la zona y a la vez podrían reducirse las emisiones de CO₂. Los agricultores podrían recibir ingresos adicionales a cambio de esta reducción, por la captura de carbono por medio de un sistema de cultivo mejorado, la cual está demostrada como competitiva en la captura de carbono frente a otros sectores, pudiendo ser incluido en los mecanismos de desarrollo limpio (MDL) del protocolo de Kioto. Los precios actuales por 1 tonelada de CO₂ secuestrado (1 crédito de carbono) son de \$4.6 dólares en promedio y de \$3.3 dólares en el año 2015 (Hamrick, *et al.*, 2016). El precio de crédito de carbono pagado por una hectárea depende del tipo de árbol y de la cantidad de árboles sembrados en la misma. Asumiendo que una hectárea puede capturar entre 200-350 ton CO₂, el precio a pagar será de 900 y 1260 dólares por hectárea año. Lo anterior, podría ofrecer otra fuente de ingreso para los campesinos de la zona, quienes conservan sus áreas de bosque.

En sintonía con lo anterior, las políticas del Mecanismo de Desarrollo Limpio, y la Estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en Carbono son iniciativas que apoyan y financian el desarrollo de acciones concretas para la reducción de emisiones, apoyando mejorar la productividad, la reducción de costos y la transferencia de tecnologías. Iniciativas a las que podrían acceder las comunidades de la zona, los cuales han demostrado su interés en el sostenimiento de los procesos de los sistemas naturales. Asimismo, el continuar con las prácticas de agricultura de menor impacto, dirigidas a la sostenibilidad de los mismo, ellos obtendrán beneficios como sostenimiento de la calidad del suelo, menor degradación,

mejores rendimientos de cultivo y fortalecimiento de la seguridad alimentaria; y a escala nacional y global, continuarían contribuyendo a la captura de carbono para mejorar la calidad del aire, agua y apoyando la mitigando del calentamiento global (FAO, 2002).

Conclusiones

Estudiar la dinámica de almacenamiento de carbono en el suelo es de interés no solo por reducir emisiones de dióxido de carbono, sino porque su acumulación y ciclado contribuyen a mantener la fertilidad del suelo, optimizando la dinámica de ciclado de nutrientes disponibles para las plantas y como soporte para la mitigación del cambio climático. De esta manera, se ha concretado y contextualizado la información relacionada con los flujos de carbono de sistemas como bosques naturales y sistemas agropecuarios andinos de montaña, lo que permitió tener claridad sobre como las principales funciones asociadas a las propiedades físico-químicas y biológicas de estos suelos ándicos, las cuales actúan para proveer el almacenamiento de carbono. De igual forma, este estudio contribuye a estimar mejor las cifras y cálculos teóricos sobre dinámica del almacenamiento de carbono en ecosistemas andinos, como aportes necesarios para la elaboración de los documentos de política nacional e internacional para emisiones de CO₂. Adicionalmente, la modelación dinámica del almacenamiento de carbono en diferentes usos del suelo (bosque, cultivo y pastura), servirá como insumo para construir modelos predictivos sobre las reservas de carbono en la zona.

Se puede afirmar que los manejos agropecuarios con menor impacto tienen el potencial de almacenar carbono, en consecuencia mejorar la calidad del suelo, como es el caso de la PN, donde las actividades agropecuarias realizadas por los campesinos están generando un mejor impacto en el servicio de almacenamiento de carbono, debido a que es un suelo que no tiene manejo intensivo, sin labranza y con entradas aleatorias de material orgánico. Estas buenas prácticas agropecuarias están orientadas a la protección del recurso hídrico, y tienen efecto en la conservación del suelo.

A partir de los resultados obtenidos, se concluye que el almacenamiento de carbono orgánico del suelo, depende de las prácticas agropecuarias. Por ello, para mantener el almacenamiento de COT en el suelo, se debe propiciar el equilibrio entre los procesos de mineralización y humificación del material orgánico,

mejorando los aportes del mismo en términos de cantidad, calidad y periodicidad. De igual forma, la reducción de las prácticas de labranza, mediante la siembra directa, sin voltear la tierra; y manteniendo los rastrojos en la superficie del suelo, permitirán evitar o minimizar una fuerte mineralización de la materia orgánica (emisión de CO₂) con la subsecuente formación de nitratos de importancia para el desarrollo de las plantas. Por último, se contribuirá a disminuir la degradación del suelo, y minimizar las pérdidas de COT por escorrentía superficial y erosión de suelo.

Recomendaciones

Se deben mejorar algunas prácticas agrícolas para acumular COT, mediante agricultura de conservación como estrategia para la captura de carbono mediante el incremento en el aporte de carbono (material orgánico) y la reducción de la descomposición, o ambos. De esta forma, se podrá sostener el servicio de almacenamiento de carbono en los suelos de la zona, para mejorar los procesos del suelo, controlar la erosión y reducir los costos de producción relacionados con la labranza, aportando beneficios para la producción agropecuaria sustentable de la zona y a la vez para reducir las emisiones de CO₂.

Se deben implementar estrategias, planes y/o políticas públicas encaminadas a garantizar la seguridad alimentaria, la preservación ambiental, así como un incremento en la producción agrícola, lo cual se puede lograr integrando estrategias enmarcadas en sistemas agrícolas sostenibles.

Las propiedades químicas y biológicas del suelo deben ser monitoreadas continuamente debido a que se encontraron cambios temporales significativos debidos a la variabilidad en los regímenes de lluvias e impactos asociados a las actividades antrópogenicas.

Se recomienda, continuar evaluando el modelo en las zonas estudiadas, así como también en otras zonas con condiciones climáticas y de suelo similares, con el fin de validar los resultados obtenidos a una mayor escala espacio – temporal y posteriormente poder desarrollar un modelo predictivo sobre la dinámica de almacenamiento de carbono en las zonas estudiadas.

Referencias

- ACTAF. (s,f). La materia orgánica. Retrieved 17-03-2016, 2016, from <http://www.actaf.co.cu/biblioteca/abonos-organicos/la-materia-organica.html>
- Acueducto y Alcantarillado de Popayán, S.-E. Resumen de la sistematización, buenas prácticas subcuenca Río Las Piedras. . Municipio de Popayán y Totoró: Acueducto y alcantarillado SA ESP.
- Acuña, O., Peña, W., Serrano, E., Pocasangre, L., Rosales, F., Delgado, E., *et al.* (2006). Importance of microorganisms for soils quality and health. *XVII Reuniao Internacional da Associacao para a Cooperacao nas Pesquisas sobre Banana no Caribe e na América Tropical*, 222-233.
- Aguilar-J, B., Brovelli, A., Porporato, A., & Barry, D. A. (2011). Modelling soil carbon and nitrogen cycles during land use change. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 31(2), 251-274.
- Altieri, M. (2011a). Capitulo 2. Agroecología: principios y estrategias para diseñar sistemas agrarios sustentables. In Ediciones Científicas Americanas (Ed.), *Agroecología: El Camino hacia una Agricultura Sustentable* (Vol. 27).
- Altieri, M. (2011b). Capítulo 11: Rotación de cultivos y labranza mínima. In Americanas (Ed.), *Agroecología: El Camino hacia una Agricultura Sustentable* 27.
- Alvarez, E., Duque, A., Saldarriaga, J., Cabrera, K., de las Salas, G., del Valle, I., *et al.* (2012). Tree above-ground biomass allometries for carbon stocks estimation in the natural forests of Colombia. [doi: 10.1016/j.foreco.2011.12.013]. *Forest Ecology and Management*, 267(0), 297-308.
- Alvarez, R., Santanatoglia, O. J., & Garcia, R. (1995). Soil respiration and carbon inputs from crops in a wheat soybean rotation under different tillage systems. *Soil Use and Management*, 11(2), 45-50.
- American Society for Testing and Materials, A. (2008b). *Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification)*. West Conshohocken, PA: American Society for Tesing and Materials.

- Amézquita, M. C., Murgueitio, E., Cuartas, C., & Cuartas, M. E. (2006). Almacenamiento de Carbono en ecosistemas terrestres para mitigar el Cambio Climático.
- Amos, B., Arkebauer, T. J., & Doran, J. W. (2005). Soil surface fluxes of greenhouse gases in an irrigated maize-based agroecosystem. *Soil Science Society of America Journal* 69(2), 387-395.
- Anderies, J. M., Janssen, M. A., & E, O. (2004). A framework to analyze the robustness of social-ecological systems from an institutional perspective. *Ecology and Society* 9, 18-34.
- Antil, R. S., Bar-Tal, A., Fine, P., & Hada, A. (2011). Predicting Nitrogen and Carbon Mineralization of Composted Manure and Sewage Sludge in Soil. [Article]. *Compost Science & Utilization*, 19(1), 33-43.
- APHA, AWWA, & WEF. (2005). *Standard methods for the examination of water and wastewater* Washington, D.C: American Public Health Association.
- Ashwani, V. (2008). A scale-hierarchical ecosystem approach to integrative ecological planning. [doi: 10.1016/j.progress.2008.05.001]. *Progress in Planning*, 70(3), 99-132.
- ASTM. (2008b). *American Society for Testing and Materials. Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification)*. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.
- ASTM. (2008e). *American Society for Testing and Materials. D 2216-05: Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass*. West Conshohocken, PA.: American Society for Testing and Materials.
- Bahr, E., Chamba Zaragocin, D., & Makeschin, F. (2014). Soil nutrient stock dynamics and land-use management of annuals, perennials and pastures after slash-and-burn in the Southern Ecuadorian Andes. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 188, 275-288.
- Bartsev, S. I., & Pochekutov, A. A. (2015). A continual model of soil organic matter transformations based on a scale of transformation rate. *Ecological Modelling*, 302, 25-28.
- Bauhus, J., Pare, D., & Cote, L. (1998). Effects of tree species, stand age and soil type on soil microbial biomass and its activity in a southern boreal forest. *Soil Biol. Biochem*, 30, 1077-1089.
- Bayón, P., & Morejón, A. (2006). Cultura ambiental y la construcción de entornos de reproducción social en Cuba: un reto para el siglo 21.

- Benda, L. e., N. Leroy Poff, Tague, C., Margaret A. Palmer, Zuto, J. P., Stanley, E., *et al.* (2002). How to Avoid Train Wrecks When Using Science in Environmental Problem Solving. *BioScience*, 52(12), 1-9.
- Bendeck, M. (2003). *Memorias Seminario Materiales Orgánicos en la Agricultura*. Paper presented at the Origen y formación del humus.
- Berkes, F., Colding, J., & Folke, C. (2003). *Navigating social-ecological systems: building resilience for complexity and change*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Berkes, F., & Folke, C. (1998). Linking Social and Ecological Systems: Management Practices and Social Mechanisms for Building Resilience. In Cambridge (Eds.),
- Bertora, C., Zavattaro, L., Sacco, D., Monaco, S., & Grignani, C. (2009). Soil organic matter dynamics and losses in manured maize-based forage systems. *European Journal of Agronomy*, 30(3), 177-186.
- Binder, C. R., J. Hinkel, P., Bots, W. G., & Pahl-Wostl., C. (2013). Comparison of frameworks for analyzing social-ecological systems. *Ecology and Society* 18(4), 26.
- Blair, J., Parmelee, R., & Beare, M. (1990). Decay rates, nitrogen fluxes and decomposer communities of single and mixed species foliar litter. *Ecology* 71, 1976-1985.
- Bolaños, J. (2012). Manejos del suelo en la zona alta de Quintana. Quintana, Cauca: Maria Cristina Ordoñez.
- Botero Botero, J.-A. (2000). *Contribución de los sistemas ganaderos tropicales al secuestro de Carbono*. Paper presented at the Agroforesteria para la producción animal en América Latina -II.
- Bottner, P., Pansu, M., Sarmiento, L., Hervé, D., Callisaya-Bautista, R., & Metselaar, K. (2006). Factors controlling decomposition of soil organic matter in fallow systems of the high tropical Andes: A field simulation approach using ¹⁴C- and ¹⁵N-labelled plant material. *Soil Biology and Biochemistry*, 38(8), 2162-2177.
- Bravo Realpe, I., Arboleda Pardo, C.-A., & Martín Peinado, F.-J. (2014). Efecto de la calidad de la materia orgánica asociada con el uso y manejo de suelos en la retención de cadmio, en sistemas altoandinos de Colombia. *Acta Agronómica*, 63(2), 164-174.
- Bremer, D. J., & Ham, J. M. (2005). Measurement and Partitioning of In situ CO₂ Fluxes in

- Turfgrasses Using a Pressurized Chamber. *Agronomy Journal*, 97(2), 627.
- Bremer, J. D., Ham, J. M., Owensby, C. E., & Knapp, A. K. (1998). Responses of soil respiration to clipping and grazing in a tallgrass prairie. *Journal of Environmental Quality*, 27, 1539-1548.
- Bremner, J. M. (1960). Determination of nitrogen in soil by the Kjeldahl method. [10.1017/S0021859600021572]. *The Journal of Agricultural Science*, 55(01), 11-33.
- Breure, A. M., De Deyn, G. B., Dominati, E., Eglin, T., Hedlund, K., Van Orshoven, J., et al. (2012). Ecosystem services: a useful concept for soil policy making! *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 4(5), 578-585.
- Burbano-Garcés, M., Figueroa-Casas, A., & Peña, M. (2014). Bulk precipitation, throughfall and stem flow deposit of N-NH₄⁺, N-NH₃ and N-NO₃⁻ in a colombian andean forest adjacent to a semi-natural wetland. *Journal of Tropical Forest Science*, 26(4), 446-457
- Burbano-Garcés, M. L., & Figueroa Casas, A. (2014b). Variabilidad espacio-temporal de aniones (SO₄⁻² y Cl⁻) en el agua de lluvia de Popayán, Colombia. *Revista de Ingenierías Universidad de Medellín*, 14(26), 27.
- Burbano, M.-L. (2013). *Caracterización de flujos hidrológicos, N-NO₃⁻, N-NH₄⁺ Y P-PO₄⁻³ en las reservas naturales de la sociedad civil, "Arrayanales" y "La laguna", subcuenca río Las Piedras (municipio de Popayán)*. Popayán: Universidad del Cauca.
- Burgi Burgi, M. (2015). Conservacion de la Naturaleza conservación de la vida. *Cuadernos de Bioetica*, XXVI(2), 253-266.
- Burgos-Nañez, A. (2015). *Fenología Del Roble Blanco (Quercus Humboldtii) En Bosques Naturales Del Macizo Colombiano, Municipio De Pitalito*. Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Pitalito, Colombia.
- Carvajal, A. F., Feijoo, A., Quintero, H., & Rondón, M. A. (2009). Carbono organico del suelo en diefrentes usos del terreno de paisajes andinos Colombianos *Rev. Cienc. Suelo Nutr. / J. Soil. Sci. Plant Nutr.*, 9(3), 222-235.
- Carvalho Leite, L. F., de Sá Mendonça, E., Oliveirade de Almeida Machado, P. L., Inácio Fernandes Filho, E. d., & Lima Neves, J. C. (2004). Simulating trends in soil organic carbon of an Acrisol under no-tillage and disc-plow systems using the Century model. *Geoderma*, 120(3-4), 283-295.
- Castaño Marín, A. M., Riaño Herrera, N. M., Peña Quiñones, A. J., Ramirez Builes, V. H., Valencia Salazar, A., Figueroa Casas, A., et al. (2015). Flujos de energía, vapor de agua y carbono en agroecosistemas andinos.

- Conceptualización y estandarización metodológica. *Acta agron (colombia)*, X.
- Cavelier, J., Jaramillo, M., Solis, D., & Leon, D. D. (1997). Water balance and nutrient inputs in bulk precipitation in tropical montane cloud forest in Panama. *Journal of Hydrology*, 193, 1-4.
- CCA. (2014). *Comisión para la Cooperación Ambiental. Evaluación de la dinámica del carbono en el bosque tropical semideciduo de la península de Yucatán* Montreal, Canadá.
- CIAT. (2006). *Centro Internacional de Agricultura Tropical - Diseño del protocolo para la caracterización de los ciclos de carbono y agua en ecosistemas de alta montaña*.
- Clark, D. (2006). Climate Change and Social/ Cultural Values in the Southwest Yukon: A Resilience-Building Perspective. *Prepared for the Northern Climate Exchange*.
- Conant, R. T., Paustian, K., & Elliott, E. T. (2001). Grassland management and conversion into grassland: effects on soil carbon. *Ecological Applications*, 11, 343-355.
- Consejería de Industria Energía y Medio Ambiente. (2010). *Junta de Extremadura. El Inventario de sumideros de carbono de Extremadura*
- CRC (2006). *Plan de ordenación y manejo de la subcuenca hidrográfica del Río las Piedras*.
- Corral, R., Duicela, L., & Maza, H. (2006). Fijación y almacenamiento de Carbono en sistemas agroforestales con café Arabigo y Cacao, en dos zonas agroecológicas del litoral Ecuatoriano. Ecuador: Consejo Cafetero Nacional.
- Costanza, R., & Voinov, A. (2001). Modeling ecological and economic systems with STELLA: Part III. *Ecological Modelling*, 143(1-2), 1-7.
- Cuatrecasas. (1958). Aspectos de la vegetación natural de Colombia. *Rev. acad. Col. Ex. Fis. Nat*, 10(40).
- Chan, K., Oates, A., Lui, D., Li, G., Prangnell, R., Poile, G., et al. (2010). *A farmer's guide to increasing soil organic carbon under pastures*. NSW, Australia.
- Chiesura, A., & De Groot, R. S. (2003). Critical natural capital: a socio-cultural perspective. *Ecological Economics*, 44, 219-231.
- Dahlgren, R. A., Saigusa, M., & Ugolini, F. C. (2004). The Nature, Properties and Management of Volcanic Soils *Advances in Agronomy* (Vol. Volume 82, pp. 113-182): Academic Press.

- Dahlgren, R. A., Ugolini, F. C., Shoji, S., Ito, T., & Sletten, R. S. (1991). Soil-Forming Processes in Alic Melanudands under Japanese Pampas Grass and Oak. *Tonneijck, Jansen, Nierop, Verstraten, J. Sevink & De Lange. Towards understanding of carbon stocks and stabilization in volcanic ash soils in natural Andean ecosystems of northern Ecuador De Langea. European Journal of Soil*, 61, 392-405.
- Daily, G. C. (2000). Management objectives for the protection of ecosystem services. *Environmental Science & Policy*, 3(6), 333-339.
- Daily, G. C., Söderqvist, T., Aniyar, S., Arrow, K., Dasgupta, P., Ehrlich, P. R., et al. (2000). The Value of Nature and the Nature of Value. *Science*, 289, 395-396.
- Demeyer, A., Voundi Nkana, J. C., & Verloo, M. G. (2001). Characteristics of wood ash and influence on soil properties and nutrient uptake: an overview. *Bioresource Technology* 77 287- 295.
- Diaz B, E. B. (2008). *Distribucion del Contenido de Carbono Organico en Agregados de diferentes Tamanos, Procedentes de Varios Sistemas de Uso y Altitudes en Suelos de la Cuenca del Rio Cauca, Colombia*. Unpublished Trabajo de grado para optar al título de Magister en CIENCIAS AGRARIAS CON ENFASIS EN SUELOS, UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, Palmiranos.
- Dominati, E., Patterson, M., & Mackay, A. (2010). A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. *Ecological Economics*, 69(9), 1858-1868.
- Doran, J. W., Coleman, D. C., Bezdicek, D. F., & Stewart, B. A. (1994). *Defining soil quality for a sustainable environment* (Vol. 35). Madison, WI: Soil Science Society of America, Inc. and the American Society of Agronomy, Inc.
- Echeverry, Y. (2012). *Estimación de la actividad y biomasa microbiana en suelos con diferentes usos en la parte alta de la microcuenca del río las Piedras*. Universidad del Cauca, Popayan.
- EPA. (2001). *Method 9045D. Soil and waste pH*. Cincinnati, Ohio: Environmental Monitoring and Support Lab., U.S. Environmental Protection Agency.
- Escobar, A. (2005). *Más allá del Tercer Mundo Globalización y Diferencia*. Instituto Colombiano de Antropología e Historia. Bogotá, Colombia. .
- Etiégni, L., & Campbell, G. (1991). Physical and chemical characteristics of wood ash. *Bioresour. Technol*, 37, 173-178.

- Eusufzai, M. K., Deb, S. K., Maeda, T., & Fujii, K. (2013). Mass Loss and C and N Release from Decomposing Fresh and Composted Residues as Affected by Cold Climate Conditions. *Environment and Natural Resources Research*, 3(2).
- Ecosistemas y Bienestar Humano: Marco para la Evaluación*, (2003).
- FAO. EX-Ante Carbon balance Tool (EX-ACT).
- FAO. (1992). *Manual de sistemas de labranza para América Latina*. Roma.
- FAO. (2002). *Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra*. Roma.
- FAO. (2010). EX-Ante Carbon balance Tool (EX-ACT).
- Fernández, M. E., & Gyenge, J. E. (2010). *Técnicas en medición en ecofisiología vegetal: concepto y procedimientos*. Buenos Aires: Ediciones INTA,.
- Finvers, M. A. (2008). *Application of e2DPSIR for analysis of soil protection issues and an assessment of British Columbia's soil protection legislation* M.Sc, Cranfield University, UK.
- Fisher, B., Turner, R. K., & Morling, P. (2009). Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecological Economics*, 68, 643-653.
- Fisher, M. J., Braz, S. P., Dos-Santos, R. S. M., Urquiaga, S., Alves, B. J. R., & Boddey, R. M. (2007). Another dimension to grazing systems: Soil carbon. *Tropical Grasslands*, 41, 65-83.
- Fisher, M. J., Santos, R. S. M. d., Alves, B. J. R., & Boddey, R. M. (2007). Another dimension to grazing systems: Soil carbon. *Tropical Grasslands*, 41, 65-83.
- Fonseca, W., Alice, F., & Rey-Benayas, J. (2012). Carbon accumulation in aboveground and belowground biomass and soil of different age native forest plantations in the humid tropical lowlands of Costa Rica. *New Forests*, 43(2), 197-211.
- Franko, U., Crocker, G. J., Grace, P. R., Klír, J., Körschens, M., Poulton, P. R., et al. (1997). Simulating trends in soil organic carbon in long-term experiments using the CANDY model. *Geoderma*, 81(1-2), 109-120.
- Franzluebbers, A., Sawchik, J., & Taboada, M. A. (2013). Agronomic and environmental impacts of pasture-crop rotations in temperate North and South America. *Agriculture, Ecosystems & Environment*(0).
- Franzluebbers, A. J. (1999). Introduction to Symposium - Microbial Biomass: Measurement and role in soil quality. *Can. J. Soil Sci*, 79, 505-506.

- Friend, A. D., Arneeth, A., Kiang, N. Y., Lomas, M., OgÉE, J., RÖDenbeck, C., *et al.* (2007). FLUXNET and modelling the global carbon cycle. *Global Change Biology*, 13(3), 610-633.
- Fu, S., Cabrera, M. L., Coleman, D. C., Kisselle, K. W., Garrett, C. J., Hendrix, P., *et al.* (2000). Soil carbon dynamics of conventional tillage and no-till agroecosystems at Georgia Piedmont-HSB-C models. *Ecological Modelling*, 131, 229-248.
- Fuentes, J. P., & Varnero, M. T. (2011). *Simposio Nacional de la Ciencia del Suelo*. Paper presented at the Calidad de carbono y propiedades biológicas como indicadores de perturbación en suelos del área mediterránea de Chile.
- Gallardo, J. F. (2012). Uso de fertilizantes y acondicionadores de suelo en agricultura ecológica. *I+D+I*, 7, 3.
- Gamarra Vergara, J. R. (2007). *La Economía del Departamento del Cauca: Concentración de Tierras y Pobreza*. . Cartagena: Banco de la República.
- Gamboa, A. M., & Galicia, L. (2011). Differential influence of land use/cover change on topsoil carbon and microbial activity in low-latitude temperate forests. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 142(3–4), 280-290.
- Goldewijk, K. K., Minnen, J. G. V., G.J.J. Kreileman, Vloedveld, M., & Leemans., R. (1994). Simulating the carbon flux between the terrestrial environment and the atmosphere. *Water, Air, and Soil Pollution*, 76, 199-230.
- Golondrin, M.-Z. (2012). Manejos del suelo en la zona alta de Quintana. In Ordoñez (Ed.). Quintana, Cauca.
- Gomez-Baggethun, E. (2011). Análisis crítico de los pagos por servicios ambientales: de la gestacion teorica a la implementación. *Revista Española de Estudios Agrosociales y pesqueros*(228), 33-54.
- Gómez-Balanta, F.-Z. (2015). *Emisión de gases de efecto invernadero y contenidos de carbono y nitrógeno del suelo en un agroecosistema ganadero altoandino en Tenerife, Valle del Cauca*. Universidad Nacional de Colombia, Palmira, Colombia.
- Gómez-Sarmiento, M. (2011). *Comparación de propiedades edáficas y procesos ecosistémicos entre plantaciones forestales y bosques secundarios subandinos*. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.
- Gomez, L., Montoya, E., Lopez, Y., & Riaño, N. (2001). *Estimacion de la fotosintesi en plantas completas y validacion de un modelo matematico pra el Cafeto*

- Coffea arabica* L. Paper presented at the Simposio Internacional y Monitoreo de Carbono en Ecosistemas Forestales.
- Gómez, L. F., Montoya, E. C., López, Y., & Riaño, N. M. (2001). *Estimación de la fotosíntesis en plantas completas y validación de un modelo matemático para café*. Paper presented at the Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales 18 al 20 de Octubre del 2001 Valdivia - Chile.
- González, A. M. (2007). Capítulo 1. Dimensión ecológica de la existencia social. *Economía Política Mundial. Las fuerzas estructurantes*. Barcelona: Ariel.
- Groot, R. S. D., Wilson, M. A., & Boumans, R. M. J. (2002). The Dynamics and Value of Ecosystem Services: Integrating Economic and Ecological Perspectives. *Ecological Economics* 41, 393-408.
- Grünzweig, J. M., Sparrow, S. D., Yakir, D., & Stuart Chapin, F. (2004). Impact of Agricultural Land-use Change on Carbon Storage in Boreal Alaska. *Global Change Biology*, 10(4), 452-472.
- Guangcai, Y., Guoyi, Z., Deqiang, Z., Xu, W., Guowei, C., & Yan, L. (2005). Dynamics of total organic carbon (TOC) in hydrological processes in coniferous and broad-leaved mixed forest of Dinghushan. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 16(9), 1655-1660.
- Guisande, C., Vari, R. P., Heine, J., García-Roselló, E., González-Dacosta, J., Perez-Schofield, B. J. G., et al. (2014). RWizard Software. Spain: University of Vigo.
- Hajek, A. (2004). *Natural enemies: an introduction to biological control*. Cambridge, MA: Cambridge University Press.
- Hammersley, M., & Atkinson, P. (2001). *Etnografía: Métodos de investigación*. Barcelona: Paidós.
- Hamrick, K., & Goldstein, A. (2016). Raising Ambition. State of the Voluntary Carbon Markets 2016 (pp. 58). Forest Trends' Ecosystem Marketplace: The climate trust.
- Hansen, S., Jensen, H. E., Nielsen, N. E., & Svendsen, H. (1991). Simulation of nitrogen dynamics and biomass production in winter wheat using the Danish simulation model DAISY. *Fertilizer research*, 27(2-3), 245-259.
- 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(1), 115-146.

- Haynes, R. J., & Williams, P. H. (1999). Influence of stock camping behaviour on the soil microbiological and biochemical properties of grazed pastoral soils. *Biology and Fertility of Soils*, 28(3), 253-258.
- Hernan Dario, S. (2012). Manejos del suelo en la zona alta de Quintana. In Ordoñez (Ed.). Quintana, Cauca.
- Hidalgo, C. (2012). Manejos del suelo en la zona alta de Quintana. In Ordoñez (Ed.). Quintana, Cauca.
- Honorio-C., E.-N., & Baker, T.-R. (2010). *Manual para el monitoreo del ciclo del carbono en bosques amazónicos*. Lima: Instituto de Investigaciones de la Amazonia Peruana / Universidad de Leeds.
- Huang, C.-Y., Hendrix, P. F., Fahey, T. J., Bohlen, P. J., & Groffman, P. M. (2010). A simulation model to evaluate the impacts of invasive earthworms on soil carbon dynamics. *Ecological Modelling*, 221(20), 2447-2457.
- Ibrahim, M., Chacón, M., Cuartas, C., Naranjo, J., Ponce, G., Vega, P., et al. (2007). Almacenamiento de carbono en el suelo y la biomasa arbórea en sistemas de usos de la tierra en paisajes ganaderos de Colombia, Costa Rica y Nicaragua. *Agroforesteria en las Americas*, 45.
- IDEAM, & Instituto de Hidrología Meteorología y estudios Ambientales (Eds.). (2001). *Colombia primera comunicacion nacional ante la convencion marco de las naciones unidas sobre el cambio climatico*.
- IGAC. (2009). *Estudio General de suelos y zonificación de tierras departamento del Cauca*. Bogota: Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- Ingaramo, O. E., Paz González, A., & Dugo Paton, M. (2003). Evaluación de la densidad aparente en diferentes sistemas de laboreos de suelo, en el NO de la Península Ibérica. . *Comunicaciones Científicas y Tecnológicas A-032*.
- Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) (Ed.). (2001). *Colombia primera comunicacion nacional ante la convencion marco de las naciones unidas sobre el cambio climatico*. Bogotá.
- Jackson, L. E., Calderon, F. J., Steenwerth, K. L., Scow, K. M., & Rolston, D. E. (2003). Responses of soil microbial processes and community structure to tillage events and implications for soil quality. *Geoderma*, 114(3-4), 305-317.
- Jagadamma, S., & Lal, R. (2010). Distribution of organic carbon in physical fractions of soils as affected by agricultural management. *Biology and Fertility of Soils*, 46(6), 543-554.

- Jeffery, S., Jones, A., Montanarella, L., Marmo, L., Miko, L., Ritz, K., *et al.* (2010). *European Atlas of Soil Biodiversity*. Luxembourg European Commission: Publications Office of the European Union.
- Jenkinson, D. S., Andrew, S. P. S., Lynch, J. M., Goss, M. J., & Tinker, P. B. (1990). The Turnover of Organic Carbon and Nitrogen in Soil [and Discussion]. *Philosophical Transactions: Biological Sciences*, 329(1255), 361-368.
- Jiménez, E., & Landeta, A. (2009). Producción de biomasa y fijación de carbono en plantaciones de teca (*Tectona grandis* Linn F.) Campus Prosperina - ESPOL. *Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción, Escuela Superior Politécnica del Litoral*
- Katz, E., Lammel, A., & Golobinoff, M. (2008). Clima meteorología y cultura en Mexico. *Ciencias*, 90, 1-67.
- Knapp, A. K., Conard, S. L., & Blair, J. M. (1998). Determinants of soil CO₂ flux from a sub-humid grassland, effect of fire and fire history. *Ecological Applications*, 8, 760-770.
- Kong, A., Six, J., Bryant, D., Denison, R., & Van, K. (2005). The relationship between carbon input, aggregation, and soil organic carbon stabilization in sustainable cropping systems. *Soil Science Society of America Journal*, 69, 1078-1085.
- Kotroczó, Z., Veresb, Z., Biró, B., Tóth, J. A., & Fekete, I. (2014). Influence of temperature and organic matter content on soil respiration in a deciduous oak forest. *Eurasian Journal of Soil Science*, 3, 303-310.
- Kurbatova, J., Li, C., Varlagin, A., Xiao, X., & Vygodskaya, N. (2008). Modeling carbon dynamics in two adjacent spruce forests with different soil conditions in Russia. *Biogeosciences*, 5, 969-980.
- Kutsch, W. L., Max-Planck, Bahn, M., Leopold-Franzens, & Heinemeyer, A. (2010). *Soil Carbon Dynamics. An Integrated Methodology*. New York: Cambridge University Press.
- Kutser, T., Pierson, D. C., Tranvik, L., Reinart, A., Sobek, S., & Kallio, K. (2005). Using Satellite Remote Sensing to Estimate the Colored Dissolved Organic Matter Absorption Coefficient in Lakes. *Ecosystems*, 8(6), 709-720.
- Kuzyakov, Y. (2006). Sources of CO₂ efflux from soil and review of partitioning methods. [doi: 10.1016/j.soilbio.2005.08.020]. *Soil Biology and Biochemistry*, 38(3), 425-448.

- Lal, R. (2010). Managing soils and ecosystems for mitigating anthropogenic carbon emissions and advancing global food security. *Bioscience*, 60, 708-721.
- Landsberg, J., & Sands, P. (2011). Chapter 5 - The Carbon Balance of Trees and Stands *Terrestrial Ecology* (Vol. Volume 4, pp. 115-149): Elsevier.
- Laterra, P., Jobbágy, E., & Paruelo, J. (2012). *Valoración de servicios ecosistémicos, conceptos, herramientas y aplicaciones para el ordenamiento territorial*.
- Lavelle, P., Rodríguez, N., Arguello, O., Bernal, J., Botero, C., Chaparro, P., et al. (2014). Soil ecosystem services and land use in the rapidly changing Orinoco River Basin of Colombia. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 185, 106-117.
- Leff, E. (2006). Aventuras de la Epistemología Ambiental: de la articulación de ciencias al diálogo de saberes. In editores. (Ed.).
- León, J. D., González, M. I., & Gallardo, J. F. (2011). Ciclos biogeoquímicos en bosques naturales y plantaciones de coníferas en ecosistemas de alta montaña de Colombia. *Rev. Biol. Trop*, 59(4), 1883-1894.
- Lescourret, F., Magda, D., Richard, G., Adam-Blondon, A.-F., Bardy, M., Baudry, J., et al. (2015). A social–ecological approach to managing multiple agroecosystem services. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 14, 68-75.
- Letten, S., Van Orshoven, J., van Wesemael, B., De Vos, B., & Muys, B. (2005). Stocks and fluxes of soil organic carbon for landscape units in Belgium derived from heterogeneous data sets for 1990 and 2000. [doi: DOI: 10.1016/j.geoderma.2004.11.001]. *Geoderma*, 127(1-2), 11-23.
- Li-xia, Y., & Jian-jun, P. (2003). Dynamics models of soil organic carbon. *Journal of Forestry Research*, 14(4), 323-330.
- Li, C., Steve, F., & Robert, H. (1994). Modeling carbon biogeochemistry in agricultural soils. *Global Biogeochem Cycles*, 8(3), 237-284.
- Li, X., Fu, H., Guo, D., Li, X., & Wan, C. (2010). Partitioning soil respiration and assessing the carbon balance in a *Setaria italica* (L.) Beauv. Cropland on the Loess Plateau, Northern China. [doi: DOI: 10.1016/j.soilbio.2009.11.013]. *Soil Biology and Biochemistry*, 42(2), 337-346.
- Linck, T. (2001). El campo en la ciudad: reflexiones sobre ruralidades emergentes. Retrieved from <http://www.clacso.edu.ar/~libros/rjave/paneles/linck.rtf>

- Liu, Q., Edwards, N. T., Post, W. M., Gu, L., Ledford, J., & Lenhart, S. (2006). Temperature independent diel variation in soil respiration observed from a temperate deciduous forest. *Global Change Biology*, 12, 2136-2145.
- Loaiza-Usuga, J. C., Juan D. León-Peláez, M. I., González-Hernández, Gallardo-Lancho, J. F., Walter Osorio-Vega, & Correa-Londoño, a. G. (2013). Alterations in litter decomposition patterns in tropical montane forests of Colombia: a comparison of oak forests and coniferous plantations. *Can. J. For. Res* 43, 528-533
- Longdoz, B., Yernaux, M., & Aubinet, M. (2000). Soil CO₂ efflux measurements in a mixed forest: impact of chamber disturbances, spatial variability and seasonal evolution. *Global Change Biology*, 6(8), 907-917.
- López Falcón, R. (2006). *Degradación del suelo, causas procesos evaluación e investigación*. Merida Venezuela: Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial -ULA-
- Lorenzatti, S. (2003). La rotación de cultivos: Una herramienta poco utilizada.
- Luo, Y., & Zhou, X. (2006a). Chapter 3 - Processes of CO₂ production in soil. In Luo & Zhou (Eds.), *Soil Respiration and the Environment* (pp. 35-59). Burlington: Academic Press.
- Luo, Y., & Zhou, X. (2006b). Chapter 4 - Processes of CO₂ transport from soil to the atmosphere. In Luo & Zhou (Eds.), *Soil Respiration and the Environment* (pp. 61-76). Burlington: Academic Press.
- Luo, Y., & Zhou, X. (2006c). Chapter 6 - Temporal and spatial variations in soil respiration. In Luo & Zhou (Eds.), *Soil Respiration and the Environment* (pp. 107-131). Burlington: Academic Press.
- Luo, Y., & Zhou, X. (2006d). *Soil Respiration and the Environment*.
- Malagon, D., & Pulido, C. (1995). *Suelos de Colombia, origen, evolución, clasificación*. Bogotá DC: Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- Manzoni, S., Taylor, P., Richter, A., Porporato, A., & Ågren, G. I. (2012). Environmental and stoichiometric controls on microbial carbon-use efficiency in soils. *New Phytologist*, 196(1), 79-91.
- Margalef, R. (1992). *Ecología*. Barcelona: Ed. revisada. Planeta.
- Martín-López, B., Gómez-Baggethun, E., González, J. A., Lomas, P. L., & Montes, C. (2009). The assessment of ecosystem services provided by biodiversity: re-thinking concepts and research needs. In Aronoff (Ed.), *Handbook of Nature Conservation* Nova Science Publishers, Inc.

- Maturana, M., & Acevedo, E. (2003). Cambios en la fertilidad del suelo asociados a cero labranza. *Laboratorio de Relación Agua - Suelo - Planta* Retrieved 09/04, 2014, from <http://www.sap.uchile.cl/index2.php?left=libros&main=publicaciones>
- McBean, G. A. (2011). Coping with Global Environmental Change: Need for an Interdisciplinary and Integrated Approach
Coping with Global Environmental Change, Disasters and Security. In Brauch, Oswald Spring, Mesjasz, Grin, Kameri-Mbote, Chourou, Dunay & Birkmann (Eds.), (Vol. 5, pp. 1193-1204): Springer Berlin Heidelberg.
- McConkey, B. G., Liang, B. C., Campbell, C. A., Curtin, D., Moulin, A., Brandt, S. A., *et al.* (2003). Crop rotation and tillage impact on carbon sequestration in Canadian prairie soils. *Soil and Tillage Research*, 74(1), 81-90.
- Evaluación de los ecosistemas del Milenio. Ecosistemas y Bienestar Humano: Marco para la Evaluación*, (2003).
- MEA. (2005). *Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-being: Biodiversity Synthesis*. Unpublished manuscript, Washington, D.C.
- Meersmans, J., van Wesemael, B., De Ridder, F., & Van Molle, M. (2009). Modelling the three-dimensional spatial distribution of soil organic carbon (SOC) at the regional scale (Flanders, Belgium). [doi: 10.1016/j.geoderma.2009.05.015]. *Geoderma*, 152(1–2), 43-52.
- Meir, P., Grace, J., Miranda, A., & 1996, J. L. (1966). Soil respiration in a rainforest in Amazonia and in cerrado in central Brazil. In Gash, Nobre, Roberts & Victoria (Eds.), *Amazonian deforestation and climate*. (pp. 319-330). Chichester, UK: John Wiley and Sons.
- Mielnick, P. C., & Dugas, W. A. (2000). Soil CO₂ flux in a tallgrass prairie. *Soil Biology and Biochemistry*, 32, 221-228.
- Minnen, J. G. V. (2008). *The terrestrial carbon cycle on the regional and global scale : modeling, uncertainties and policy relevance*. Wageningen University.
- Molina, J. A. E., Clapp, C. E., Shaffer, M. J., Chichester, F. W., & Larson, W. E. (1983). NCSOIL, A Model of Nitrogen and Carbon Transformations in Soil: Description, Calibration, and Behavior. *Soil Science Society of America Journal*, 47(1), 85-91.
- Moreno, F. H., & Oberbauer, S. F. (2008). Dynamics of Soil Carbon in Primary and Secondary Tropical Forests in Colombia. In Bravo, Jandl, LeMay & von

- Gadow (Eds.), *Managing Forest Ecosystems: The Challenge of Climate Change* (Vol. 17, pp. 283-296): Springer Netherlands.
- Moyano, F. E., Manzoni, S., & Chenu, C. (2013). Responses of soil heterotrophic respiration to moisture availability: An exploration of processes and models. *Soil Biology and Biochemistry*, 59(0), 72-85.
- Mujuru, L., Mureva, A., Velthorst, E. J., & Hoosbeek, M. R. (2013). Land use and management effects on soil organic matter fractions in Rhodic Ferralsols and Haplic Arenosols in Bindura and Shamva districts of Zimbabwe. *Geoderma*, 209–210(0), 262-272.
- NEA. (2011). *The UK National Ecosystem Assessment: Synthesis of the Key Findings*. Cambridge: UNEP-WCMC.
- Newman, L. (2006). Change, uncertainty, and futures of sustainable development. *Futures* 38, 633-637.
- Nouvellon, Y., Epron, D., Kinana, A., Hamel, O., Mabilia, A., D'Annunzio, R. m., et al. (2008). Soil CO₂ effluxes, soil carbon balance, and early tree growth following savannah afforestation in Congo: Comparison of two site preparation treatments. *Forest Ecology and Management* 255, 1926-1936.
- Odum, E. P. (1972). *Ecología*. México D. F: Nueva Editorial Interamericana.
- Ordóñez-Díaz, M.-C., Bravo-Realpe, I., & Figueroa-Casas, A. (2013). Flujo de Carbono Orgánico Total (COT) en una cuenca andina: caso subcuenca Río Las Piedras. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 13(24), 14.
- Ordoñez, M.-C., Galicia, L., Figueroa, A., Bravo, I., & Peña, M. (2015). Effects of peasant and indigenous soil management practices on the biogeochemical properties and carbon storage services of Andean soils of Colombia. *European Journal of Soil Biology*, 71, 28-36.
- OSE. (2011). *Observatorio de la sostenibilidad en España. Biodiversidad en España: base de las sostenibilidad ante el cambio global*: S.A. Mundi-Pesa Libros.
- Otero, J. D., Figueroa, A., Muñoz, F. A., & Peña, M. R. (2011). Loss of soil and nutrients by surface runoff in two agro-ecosystems within an Andean paramo area. *Ecological Engineering*, 37(12), 2035-2043.
- Pabst, H., Kühnel, A., & Kuzyakov, Y. (2013). Effect of land-use and elevation on microbial biomass and water extractable carbon in soils of Mt. Kilimanjaro ecosystems. *Applied Soil Ecology*, 67(0), 10-19.

- Pachico, D., Ashby, I. A., & Sanint, L. R. (1994). *Natural Resource and Agricultural Prospects Cor the Hillsides of Latin America. Presented at IFPRI 2020 Vision Conference, Washington, D.C. November 7-10, 1994.*
- Palm, C., Blanco-Canqui, H., DeClerck, F., Gatere, L., & Grace, P. (2013). Conservation agriculture and ecosystem services: An overview. *Agriculture, Ecosystems & Environment* (0), 19.
- Pansu, M., Sarmiento, L., Metselaar, K., Hervé, D., & Bottner, P. (2007). Modelling the transformations and sequestration of soil organic matter in two contrasting ecosystems of the Andes. *European Journal of Soil Science*, 58(3), 775-785.
- Pardos, J. (2010). *Los ecosistemas forestales y el secuestro de carbono ante el calentamiento global*: Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria, Ministerio de Ciencia e Innovación
- Parton, W. J., & Rasmussen, P. E. (1994). Long-Term Effects of Crop Management in Wheat-Fallow: II. CENTURY Model Simulations. *Soil Science Society of America Journal*, 58(2), 530-536.
- Paz, I. E., Sánchez, M., & Sadeghian, S. (2006). Relación entre dos sistemas de sombrío de café y algunas propiedades del suelo en la meseta de Popayán, Colombia. *acta agron (colombiana)*, 55(4), 1-6.
- Pearson, T., Walker, S., & Brown, S. (2005). *Sourcebook for Land use, land-use change and forestry projects*: Winrock International.
- Perdomo, C., Barbazán, M., & Durán, J. (1998). *NITRÓGENO*. Montevideo: Facultad de Agronomía Universidad de la Republica.
- Peterson, M. J., Hall, D. M., Feldpausch-Parker, A. M., & Peterson, T. R. (2010). Obscuring Ecosystem Function with Application of the Ecosystem Services Concept *Conservation Biology*, 24(1), 113-119.
- Ponce-Hernández, R., Koohafkan, P., & Antoine, J. (2004). *Assessing carbon stocks and modeling win-win scenarios of carbon sequestration through land-use changes*. Rome, Italy: FAO.
- Porporato, A., D'Odorico, P., Laio, F., & Rodriguez-Iturbe, I. (2003). Hydrologic controls on soil carbon and nitrogen cycles. I. Modeling scheme. *Advances in Water Resources*, 26(1), 45-58.
- Potschin, M. (2009). Land use and the state of the natural environment. [doi: DOI: 10.1016/j.landusepol.2009.08.008]. *Land Use Policy*, 26(Supplement 1), S170-S177.

- Power, A. G. (2010). Ecosystem services and agriculture: tradeoffs and synergies. *Phil. Trans. R. Soc. B* 365, 2959-2971.
- Prentice, C., Heimann, M., & Sitch, S. (2000). The Carbon Balance of the Terrestrial Biosphere: Ecosystem Models and Atmospheric Observations. *Ecological Applications*, 10(6), 1553-1573.
- Quintana, A.-p. (2008). *El conflicto por la gestión del servicio de acueducto en Desquebradas (Risaralda-Colombia). Un estudio desde la ecología política.* Universidad de Barcelona, Barcelona.
- Ramírez-Correa, J. A., Zapata-Duque, C. M., León-Peláez, J. D., & González-Hernández, M. I. (2007). Caída de hojarasca y retorno de nutrientes en bosques montanos andinos de Piedras Blancas, Antioquia, Colombia *Interciencia*, 32(5), 8.
- Ramirez, Á. A., & Moreno, F. H. (2008). Respiración microbial y de raíces en suelos de bosques tropicales primarios y secundarios (Porce, Colombia). *Rev.Fac.Nal.Agr.Medellín [online]*. 61(1), 4381-4393.
- Ramirez Palacio, Á. A., & Moreno-H, F. H. (2008). Respiración microbial y de raíces en suelos de bosques tropicales primarios y secundarios (Porce, Colombia). *Rev.Fac.Nal.Agr.Medellín [online]*. 61(1), 4381-4393.
- Resilience Alliance. (2010). Assessing resilience in social ecological system: workbook for practitioners. Version 2.0 (on Line www.resilience.org/3871.php).
- Riaño, N. M., Tangarife, G., Osorio, O. I., Giraldo, J. F., Ospina, C. M., Obando, D., et al. (2005). Modelo de crecimiento y captura de carbono para especies forestales en el trópico, *CENICAFÉ*
Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural
Corporación Nacional de Fomento y Desarrollo Forestal (CONIF).
- Rivera-Ospina, D., & Rodríguez, C. (2011). *Guía divulgativa de criterios para la delimitación de páramos de Colombia* Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial e Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Robinson, D. A., Hockley, N., Cooper, D. M., Emmett, B. A., Keith, A. M., Lebron, I., et al. (2013a). Natural capital and ecosystem services, developing an appropriate soils framework as a basis for valuation. *Soil Biology and Biochemistry*, 57, 1023-1033.
- Robinson, D. A., Hockley, N., Cooper, D. M., Emmett, B. A., Keith, A. M., Lebron, I., et al. (2013b). Natural capital and ecosystem services, developing an

- appropriate soils framework as a basis for valuation. *Soil Biology and Biochemistry*, 57(0), 1023-1033.
- Rodriguez, J. P., Beard Jr, T. D., Bennett, E. M., Cumming, G. S., Cork, S. J., Agard, J., et al. (2006). Trade-offs across space, time, and ecosystem services. *Ecology and Society*, 11(1).
- Rosell, R. (s,f). *Transformación de la materia organica en el suelo*.
- Rovis, J., & Sarria, A. (2013). *Caracterización florística y estructural del bosque natural de la reserva Arrayanales, en la vereda Quintana, municipio de Popayán.*, Universidad del Cauca, Popayán.
- Roy-Ladurie, E. L. (1990). *Historia del clima despues del año mil*. Paris.
- Rügnitz, M. T., Chacón, M. L., & Porro, R. (2009). Guía para la Determinación de Carbono en Pequeñas Propiedades Rurales. In (IA) (Ed.) (Vol. 1. ed, pp. 79). Lima, Perú.
- Ryan, M. G., & Law, B. E. (2005). Interpreting, Measuring, and Modeling Soil Respiration. *Biogeochemistry*, 73(1), 3-27.
- Sáenz, O. (2007). *Las ciencias ambientales: una nueva área del conocimiento. Tesis y propuestas.* . Bogotá, Colombia: Red Colombiana de Formación Ambiental.
- Salas, J., & Infante, A. (2006). Producción primaria neta aérea en algunos ecosistemas y estimaciones de biomasa en plantaciones forestales. *Revista Forestal Latinoamericana, Julio–Diciembre, año, 21(40)*, 47-70.
- Salazar, C., & Betancourth, C. (2009). Evaluación de extractos de plantas para el manejo de polilla guatemalteca (*Tecia solanivora*) en cultivos de papa en Nariño, Colombia. *Agronomía Colombiana*, 27(2), 219-226.
- Salinas, N., Malhi, Y., Meir, P., Silman, M., Cuesta, R. R., Huaman, J., et al. (2011). The Sensitivity of Tropical Leaf Litter Decomposition to Temperature: Results from a LargeScale Leaf Translocation Experiment along an Elevation Gradient in Peruvian Forests. *The New Phytologist*, 189(4), 967-977.
- Sánchez-Cárdenas, S., Crespo-López, G., Hernández-Chávez, M., & García-Ortega, Y. (2007). Estudio de la descomposición de la hojarasca en un pastizal de *Panicum maximum* Jacq cv. Likoni. *Pastos y Forrajes*, 30(4), 2007.
- Sánchez, P. (1981). *Suelos del Trópico. Características y manejos*. San José, Costa Rica: Instituto Interamericano de cooperación para la agricultura.

- Sanderson, M. A., Archer, D., Hendrickson, J., Kronberg, S., Liebig, M., Nichols, K., *et al.* (2013). Diversification and ecosystem services for conservation agriculture: Outcomes from pastures and integrated crop-livestock systems – Corrigendum. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 28(02), 194-194.
- Sandoval-Arriola, I.-E. (2006). *Producción de hojarasca y reciclaje de nutrientes de dos especies arbóreas y dos gramíneas en pasturas de Muy Muy, Nicaragua* Costa Rica.
- Schumacher, B. A. (2002). *Methods for the Determination of Total Organic Carbon (TOC) in Soils and Sediments*. Washington, DC: EPA.
- Serrano, J. P., & Gómez, C. G. (1999). *Historia y Ecohistoria ante la crisis ambiental*. Coimbra: centro de estudios de historia do Atlântico.
- Seybold, C. A., Herrick, J. E., & Brejda, J. J. (1999). Soil resilience: a fundamental component of soil quality. *Soil Science*, 164, 224-234.
- Shaw, M. R., Pendleton, L., Cameron, D., Morris, B., Greg Bratman, Bachelet, D., *et al.* (2009). *The impact of climate change on California's Ecosystem Services*: California Climate Change Center.
- Sierra, C. A., Valle, J. I. d., & Orrego, S. A. (2003). Ecuaciones de biomasa de raíces en bosques primarios intervenidos y secundarios. In S. A. Orrego (Ed.), *Medición de la captura de carbono en ecosistemas forestales tropicales de Colombia: Contribuciones para la mitigación del cambio climático* (pp. 314). Bogotá.: Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, Centro Andino para la Economía en el Medio Ambiente
- Singh, S. P. (2002). Balancing the approaches of environmental conservation by considering ecosystem services as well as biodiversity. *Current Science* 82, 1331-1335.
- Smith, P., Smith, J. U., Powlson, D. S., McGill, W. B., Arah, J. R. M., Chertov, O. G., *et al.* (1997). A comparison of the performance of nine soil organic matter models using datasets from seven long-term experiments. *Geoderma*, 81(1–2), 153-225.
- Soltner, D. (1990). *Les bases de la production végétale (I): le sol* (18 ed.): Coll. Sci. Tech. Agricoles.
- Sollins, P., Cline, S. P., Verhoeven, T., Sachs, D., & Spycher, G. (1987). Patterns of log decay in old-growth Douglas-fir forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 17(12), 1585-1595.

- Staff, S. S. (2004). *Method 3B6a. Soil survey laboratory methods manual* (R. Burt ed. Vol. 42). Washington, DC: USDA-NRCS. GPO.
- Stuart Chapin III, F., McFarland, J., David McGuire, A., Euskirchen, E. S., Ruess, R. W., & Kielland, K. (2009). The changing global carbon cycle: linking plant–soil carbon dynamics to global consequences. *Journal of Ecology*, 97(5), 840-850.
- Sus, O., Williams, M., Bernhofer, C., Béziat, P., Buchmann, N., Ceschia, E., *et al.* (2010). A linked carbon cycle and crop developmental model: Description and evaluation against measurements of carbon fluxes and carbon stocks at several European agricultural sites. [doi: 10.1016/j.agee.2010.06.012]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 139(3), 402-418.
- Suzuki, T., & Ichii, K. (2010). Evaluation of a terrestrial carbon cycle submodel in an Earth system model using networks of eddy covariance observations. *Tellus B*, 62(5), 729-742.
- Swift, R. S. (2001). Sequestration of carbon by soil. *Soil Science*, 166, 858-871.
- Tamásy, C. (2013). Areas of intensive livestock agriculture as emerging alternative economic spaces? *Applied Geography*, 45(0), 385-391.
- Taylor, C. (1991). *The Ethics of Authenticity*. Massachusetts and London, England: Harvard University Press Cambridge.
- Termorshuizen, J. W., & Opdam, P. (2009). Landscape services as a bridge between landscape ecology and sustainable development. *Landscape Ecology*, 24(8), 1037-1052.
- Thomsen, I., & Christensen, B. (2004). Yields of wheat and soil carbon and nitrogen contents following long-term incorporation of barley straw and ryegrass catch crops. *Soil Use and Management*, 20, 432-438.
- Tonneijck, F. H., Jansen, B., Nierop, K. G. J., Verstraten, J. M., Sevink, J., & Lange, L. D. (2010). Towards understanding of carbon stocks and stabilization in volcanic ash soils in natural Andean ecosystems of northern Ecuador. *European Journal of Soil*, 61, 392-405.
- Tonucci, R. G., Nair, P. K., Nair, V. D., Garcia, R., & Bernardino, F. S. (2011). Soil Carbon Storage in Silvopasture and Related Land-Use Systems in the Brazilian Cerrado. *Environ. Qual*, 40, 33-841.
- Tóth, G., Stolbovoy, V., & Montanarella, L. (2007). *Soil Quality and Sustainability Evaluation - An integrated approach to support soil-related policies of the European Union*. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communitie EUR 22721.

- Trujillo, W., Fisher, M. J., & Lal, R. (2006). Root dynamics of native savanna and introduced pastures in the Eastern Plains of Colombia. *Soil and Tillage Research*, 87(1), 28-38.
- Tschakert, P., Huber-Sannwald, E., Dennis S. Ojima, Raupach, M. R., & Schienke, E. (2008). Holistic, adaptive management of the terrestrial carbon cycle at local and regional scales. *Global Environmental Change* 18, 128-141.
- Turner, D. P., Ritts, W. D., Yang, Z., Kennedy, R. E., Cohen, W. B., Duane, M. V., et al. (2011). Decadal trends in net ecosystem production and net ecosystem carbon balance for a regional socioecological system. *Forest Ecology and Management*, 262(7), 1318-1325.
- Valentini, C. M. A., Sanches, L., de Paula, S. R., Vourlitis, G. L., de Souza Nogueira, J., Pinto, O. B., et al. (2008). Soil respiration and aboveground litter dynamics of a tropical transitional forest in northwest Mato Grosso, Brazil. *Journal of Geophysical Research*, 113, 11.
- Vance, E. D., Brookes, P. C., & Jenkinson, D. S. (1987). Microbial biomass measurements in forest soils: The use of the chloroform fumigation-incubation method in strongly acid soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 19(6), 697-702.
- Vargas, L., & Varela, A. (2007). Producción de hojarasca de un bosque de niebla en la reserva natural la planada (Nariño, Colombia). *Universitas Scientiarum*(Es1), 35-49.
- Vasques, G. M., Grunwald, S., Comerford, N. B., & Sickman, J. O. (2010). Regional modelling of soil carbon at multiple depths within a subtropical watershed. [doi: DOI: 10.1016/j.geoderma.2010.03.002]. *Geoderma*, 156(3-4), 326-336.
- Veneklaas, E. J. (1990). Nutrient Fluxes in Bulk Precipitation and Throughfall in Two Montane Tropical Rain Forests, Colombia. *Journal of Ecology*, 78(4), 974-992.
- Agricultura de conservación y captura de carbono en el suelo: Entre el mito y la realidad del agricultor*, 16 (2015).
- Visser, S., & Parkinson, D. (1992). Soil biological criteria as indicators of soil quality: Soil microorganisms. *Am. J. Alternat Agric*, 7(1/2), 33-37.
- Wadsworth, F. H. (2000). Producción Forestal para América Tropical *Agriculture Handbook #710* (pp. 70-111). Washington: U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service.

- Walker, S. M., & Desanker, P. V. (2004). The impact of land use on soil carbon in Miombo Woodlands of Malawi. *Forest Ecology and Management*, 203(1–3), 345-360.
- Wallace, K. J. (2007). Classification of ecosystem services: Problems and solutions. *Biological conservation*, 139, 235-246.
- Wang, M. C., Liu, C. P., & Sheu, B. H. (2004). Characterization of organic matter in rainfall, throughfall, stemflow, and streamwater from three subtropical forest ecosystems. *Journal of Hydrology*, 289(1–4), 275-285.
- Weerakkody, J., & Parkinson, D. (2006). Input, accumulation and turnover of organic matter, nitrogen and phosphorus in surface organic layers of an upper montane rainforest in Sri Lanka. *Pedobiologia*, 50, 377-383.
- Whitaker, J., Ostle, N., Nottingham, A. T., Ccahuana, A., Salinas, N., Bardgett, R. D., *et al.* (2014). Microbial community composition explains soil respiration responses to changing carbon inputs along an Andes-to-Amazon elevation gradient. *Journal of Ecology*, 102(4), 1058-1071.
- Wilcke, W., Yasin, S., Valarezo, C., & Zech, W. (2001). Change in water quality during the passage through a tropical montane rain forest in Ecuador. *Biogeochemistry*, 55(1), 45-72.
- XingChang, W., ChuanKuan, W., & GuiRui, Y. (2008). Spatio-temporal patterns of forest carbon dioxide exchange based on global eddy covariance measurements. *Sci China Ser D-Earth Sci* 51 (8), 1129-1143.
- Xu, X., Inubushi, K., & Sakamoto, K. (2006). Effect of vegetations and temperature on microbial biomass carbon and metabolic quotients of temperate volcanic forest soils. *Geoderma*, 136(1–2), 310-319.
- Yuna, Q., Guangcai, Y., Yan, L., & Yan, L. (2009). Dynamics of total organic carbon (TOC) in hydrological processes and its contributions to soil organic carbon pools of three successional forest ecosystems in southern China. *Ecology and Environmental Sciences*, 18(6), 2300-2307.
- Zambrano, A., Franquis, F., & Infante, A. (2004). Emisión y captura de carbono en los suelos en ecosistemas forestales *Rev. For. Lat*, 35, 11-20.
- Zapata-Duque, C.-M., Ramírez, J.-A., Peláez, J.-D. L.-., & González-Hernández, M.-I. (2007). Producción de hojarasca fina en producción de hojarasca fina en bosques altoandinos de Antioquia, Colombia. *Rev.Fac.Nal.Agr.Medellín*, 60(1), 3771-3784.
- Zapata Duque, C.-M., Ramírez, J.-A., Juan-Diego, L. P., & González Hernández, M.-I. (2007). Producción de hojarasca fina en bosques altoandinos de

Antioquia, Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 60(1).

- Zhongyuan, Y. U., & Hua, B. I. (2011). The key problems and future direction of ecosystem services research. [doi: 10.1016/j.egypro.2011.03.012]. *Energy Procedia*, 5(0), 64-68.
- Zhou, X., Sherry, B., An, Y., Wallace, L. L., & Luo, Y. (2006). Main and interactive effects of warming, clipping, and doubled precipitation on soil CO₂ efflux in a grassland ecosystem. *Global Biogeochemical Cycles* (in press).

Anexo 1

Tabla 6. Correlación de Pearson entre las características físicas, químicas y biológicas de los suelos de pastura natural (PN), cultivo de forraje (CF) y bosque natural (BN). N = 216.

		Densidad Aparente (gr.cm-3)	Humedad Higroscópica (%)	Humedad del suelo (%)	Carbono Orgánico (%)	COT (ton ha ⁻¹)	pH	Actividad microbiana (µgCO ₂ g ⁻¹ d ⁻¹)
Precipitación (mm)	Coef.			.246**				.304**
	Correlación Sig. (2- colas)			0				0
Carbono Orgánico (%)	Coef.	-.538**	.709**			.666**	.649**	.355**
	Correlación Sig. (2- colas)	0	0			0	0	0
COT (ton ha ⁻¹)	Coef.		.338**		.666**		.188**	.200**
	Correlación Sig. (2- colas)		0		0		0.005	0.003
pH	Coef.	-.419**	.564**		.649**	.188**		.468**
	Correlación Sig. (2- colas)	0	0		0	0.005		0

Nitrógeno Total (%)	Coef.	-0.453**	.683**	.839**	.537**	.561**	.180**
	Correlación Sig. (2- colas)	0	0	0	0	0	0.008
Relación C/N Suelo	Coef.	-0.194**		.342**	.197**	.231**	.389**
	Correlación Sig. (2- colas)	0.004		0	0.004	0.001	0
Actividad microbiana ($\mu\text{gCO}_2\text{g}^{-1}\text{d}^{-1}$)	Coef.			.355**	.200**	.468**	
	Correlación Sig. (2- colas)			0	0.003	0	
Arena (%)	Coef.		.243**	.405**		.519**	.510**
	Correlación Sig. (2- colas)		0	0		0	0

** Diferencia altamente significativa al nivel de 0.05 (dos colas)

Anexo 2

Memorias taller de diagnóstico para el levantamiento de información base en los temas social, agua, suelo, flora y fauna de la parte media y alta de la Cuenca Río las Piedras.

Taller: Diagnóstico para el levantamiento de información base en los temas social, agua, suelo, flora y fauna de la parte media y alta de la Cuenca Río las Piedras.

Fecha: miércoles 19 de diciembre de 2012.

Lugar: Vereda Las Guacas.

Participantes: Liliana Recaman - Jefe Fundación Procuencia Río Las Piedras; representantes de ASOCAMPO; Equipo de trabajo de Educación Ambiental y responsables del plan de monitoreo-Grupo de Estudios Ambientales.

Situación encontrada: se reunieron a los representantes de la Asociación campesina de Popayán, Red de reservas campesinas – Asocampo, con el equipo de trabajo de la Fundación Procuencia Río Las Piedras y el equipo de trabajo del Grupo de Estudios Ambientales. Para conocer como son las condiciones generales de los componentes: social, agua, suelo, vegetación, fauna entre otros. Y se indago con la comunidad de la parte media y alta de la cuenca del Río Piedras, sobre los cambios o transformaciones que han presentado u observado dichos componentes en su zona.

Encontrando:

AGUA: se ha observado una mejora de la calidad y cantidad del recurso hídrico, debido a las acciones de protección, manejo de cercas eléctricas para evitar el paso de animales hacia las fuentes de agua y el manejo de sistemas silvopastoriles.

Adicionalmente la comunidad hace conservación y protección de los ojos o nacimientos de agua.

SUELO: Desde hace más de 20 años se realizan labores de mantenimiento y el manejo de suelos con abono orgánico desde hace tiempo (más de 5 años), ha mejorado la producción de cultivos y de las pasturas, se ha observado que el ganado produce más cantidad de leche.

CULTURAL: las tradiciones religiosas se han ido perdiendo y las tradiciones de compartir en fechas especiales como la noche buena que se celebraba comunitariamente.

Se ha participado en programas de investigación, como el del programa conjunto, para abordar el tema del cambio climático y la calidad de vida.

Desearían que hubiera mayor participación de los niños y jóvenes en los procesos de educación ambiental.

VEGETACIÓN: se ha visto afectada por la presencia de ganado, debido a la dificultad de crear bebederos ecológicos, ocasionada por la poca accesibilidad a las fuentes de agua, por lo que es necesario dar paso al ganado a través de la vegetación riparia.

FAUNA: en los últimos años, por la conservación en bosques, que se viene realizando especies de aves y mamíferos han regresado. También se ha observado la recuperación del venado, armadillos, mariposas, aves como el tucán, tigrillo, pericos, pavas, torcazas.

TRANSFORMACION DEL PAISAJE: desde 1963 se ha ido alterando por la construcción de vías de acceso, lo que ha generado la degradación de los páramos.

CLIMA: la comunidad ha percibido un incremento de largas temporadas de sequía y veranos más intensos.

Una vez escuchados los comentarios de la comunidad, acerca de los cambios y el estado de los diferentes componentes que ellos perciben, se indaga acerca de los beneficios que ellos reciben de dichos componentes, primero definiendo lo que ellos consideran un servicio ecosistémico.

IDEAS PARA DEFINIR SERVICIO ECOSISTÉMICO POR LA COMUNIDAD:

- Protección que se le hace al medio ambiente.
- Protección del recurso hídrico.
- Diferentes acciones que llevan las comunidades para favorecer el recurso hídrico.
- Beneficios: suministro de recurso hídrico – energía, tomar, agricultura, ganadería.
- Interacción entre el ser humano y beneficios que obtiene el hombre.

CONCEPTO FINAL DE SERVICIO ECOSISTEMICO: es lo que nos brinda la naturaleza en interacción entre el ser humano y el medio ambiente, en donde el hombre recibe beneficios.

Una vez aclarado el concepto, se identificaron los servicios ecosistémicos por la comunidad.

1. Identificación de los Servicios Ecosistémicos.

ABASTECIMIENTO	REGULACIÓN	CULTURAL	OTRO
Soluciones de agua Abastecimiento para mayor población. Agua de mejor calidad	Regulación del clima Regulación del ciclo hidrológico Suministro del recurso hídrico	Valorización de los predios Fomento del ecoturismo Zonas de esparcimiento	Incentivos estatales Acceso a apoyos por ONG´s
Mayor disponibilidad de recurso maderero	Protección de los recursos naturales	Desarrollo de escuelas de campo “aprender haciendo”	Mantenimiento de frutales
Aumento producción agrícola y pecuaria	Disponibilidad de oxígeno	Mantener la tradición oral y cultural	Mejoramiento de las unidades de producción

Mejorar la seguridad/soberanía alimentaria		Conocimiento del territorio	Mantenimiento de fauna silvestre
Energía eléctrica		Generación y mantenimiento de la red de reservas	Riqueza florística

Anexo 3

A continuación se transcriben algunas de las entrevistas que permitieron recoger la cosmovisión de las comunidades campesinas e indígenas en relación al manejo del suelo, agua y coberturas de bosque. En un primer momento se tuvo la posibilidad de entrevistar a la población campesina y a varios líderes de su comunidad, los cuales nos permitieron conocer cuál es el tratamiento que se le está dando a los recursos.

“Bueno, nosotros la extensión que manejamos como redes de reserva son 4 hectáreas, tenemos parte en conservación parte en praderas, potreros y parte en producción agrícola. La parte de suelos en la cobertura de bosque natural lo tenemos totalmente aislado, la parte zona de potrero todo esta arborizado pero es con árboles nativos, no son introducidos todos son nativos, el tema de cultivos, el manejo que se hace es producción limpia con productos orgánicos con abono orgánico al igual que toda la maleza y los residuos de las cosechas son utilizados para el mismo abono, entonces pues se hace un buen manejo en la parte de suelo, también se utiliza digamos plantas alelopáticas para el control de enfermedades y plagas y se hacen cultivos asociados con rotación de cultivos” (Golondrin, 2012).

Siguiendo con las diversas opiniones, Hidalgo (2012) nos comenta:

“En cuanto al suelo se ha venido manejando los sistemas agrosilvopastoriles en la finca, se maneja con barreras vivas, cerca eléctrica. Por la rotación de potreros, se está haciendo la regeneración de potreros y regeneración de la cuenca y el manejo del agua, todo eso es un manejo integrado. Actualmente se está implementado también la labranza mínima, para evitar también la erosión y el desgaste del suelo. (...) El suelo o la tierra como tal,

inicialmente decíamos que el suelo apenas era la cápita vegetal, donde estaba el compos, todo eso, pero hay una teoría que dice que no, que el suelo es todo lo que pisamos”

Causa curiosidad como las prácticas tradicionales se mezclan con las modernas para lograr un mayor impacto en cuanto a productividad se trata, y a su vez consolidándose un modelo que beneficie de manera directa a la preservación medioambiental

“Bueno, digamos que mi papá es agricultor y es algo que he aprendido empíricamente y otras cosas con visitas o sitios que hemos tenido la oportunidad de ir por parte de la fundación Río Piedras intercambiando experiencias. Hemos aprendido muchas cosas, entonces eso lo hemos venido aplicando y realmente es algo que funciona para, digamos, para la producción agrícola, igual la parte pecuaria y todo muy bueno. Es un proceso que viene hace más de diez años en donde comenzamos a trabajar juciositos, digamos en la reserva, porque, realmente nosotros no estábamos de lleno, las habíamos abandonado porque igual por la educación se tuvo que salir a otro lado y permanecimos fuera, pero ahora mirando que hay buenas alternativas de trabajar ya le hemos dedicado tiempo completo a la reserva y si se puede trabajar. Y como resultado la producción ha mejorado, porque igual, digamos la producción cuando uno quiere sacar unos buenos productos hay que dedicarle tiempo completo y estar pendiente en todo momento de lo que uno está haciendo, entonces si hay resultado siempre y cuando uno sea juicioso y este pendiente de la producción y este haciendo bien el trabajo” (Golondrin, 2012).

En cuanto a la utilización de químicos se pueden identificar dos experiencias la primera en cuanto a que no se utilizan debido al imaginario de que si se emplean se pueda producir un descenso en la productividad y la segunda refiere a un sistema mixto el cual apunta a ser más orgánico que químico.

“Nunca ha sido químico, gracias a Dios mi papá nunca ha implementado químico en el predio y eso es una ventaja porque cuando se cultiva con abonos químicos siempre va estar dependiendo, dependiendo y si usted siembra una planta nunca le va dar, digamos no va dar buen resultado o buen producto. Nosotros, el caso de mi papá maneja puro abonos orgánicos y hasta el momento nos ha ido bien, el mercadeo y los productos porque él tiene tomate bajo cubierta, cuando hay producción los productos son apetecidos, ósea tiene buena comercialización, en ese sentido”. (Golondrin, 2012)

“En cuanto a químicos, se puede decir que es un sistema combinado, pero más que todo es con los mismos abonos que se producen en la finca” (Hidalgo, 2012)

Como se ha podido observar lo anterior refiere a una dinámica local en cuanto usos y manejos del suelo, ahora cabe la pena identificar el trato que le dan al agua como la utilizan y la conservan así como también conservan los bosques.

“Lo que pasa es que la reserva de mi mamá no tiene nacimientos de agua, ¡pero! al lado de nosotros están mis dos tías, hay dos reservas más donde nace el agua, donde se ha hecho la parte de conservación del bosque natural donde está el nacimiento de agua y fundación Río Piedras nos apoyaron para la construcción de una solución de agua. Entonces pues se tiene el agua para el consumo, el agua para los sistemas de riego. Gracias a Dios no sufrimos por el agua, pero porque se ha hecho una buena conservación y se hace un buen manejo. (...) Nosotros digamos, el agua solamente cuando se necesita para riegos, se utiliza, de resto la que sobra, se va, para río Piedras, y nosotros en el caso de la cocina todo se hace uso racional del agua, se hace un buen manejo, ósea no desperdiciamos

agua, porque todo el agua sabemos que la ciudad de Popayán la necesita, entonces el agua que sobra se va para la quebrada del río Piedras. (...) El agua si sale y de todas maneras cae al río Piedras, pero también hay plantación de cartucho que es algo que ayuda, digamos a descontaminar un poco el agua. Por donde sale el agua siempre están las matas de cartucho, pero ahí a bajar al río hay como unos 200 metros a caer a la quebrada, entonces creemos que durante ese tiempo ya va descontaminando un poco". (Golondrin, 2012)

Por su parte Cesar Hidalgo afirma:

"El agua también se le da un manejo especial ya que, pues en la zona, es decir los acueductos las soluciones de agua se utilizan más que todo para el consumo doméstico, las soluciones de agua que se han hecho son para consumo doméstico, entonces se está trabajando con bebederos ecológicos, un bebedero con flotador que a medida que se va consumiendo el agua, el agua va llegando pero también llega un momento en que el agua se frena por el flotador, entonces no hay desperdicio, eso se llama un bebedero ecológico. (...) Con las aguas residuales se está implementado los sistemas de atrapa grasas y también para las aguas residuales de la cocina y para las aguas blancas se están utilizando las trampas. (...) Se conserva el agua porque pues, es un bien natural que tenemos que cuidarlo para nosotros mismos y para la ciudad de Popayán, porque se está ubicado en la parte alta de la cuenca"

En cuanto a los bosques y su manejo

"La parte de bosque tenemos dos partes, una que está en regeneración, es muy pequeño, la parte que está en bosque natural es solo roble, encenillo, nacedero, también hay mandur. Ósea árboles nativos, pero más que todo es el roble el que hemos venido conservando, se hace un buen manejo, se regenera solito y ahí lo mantenemos, lo hemos tenido desde siempre, desde la generación

de mi abuelito y mi abuelita paso a manos de mi mamá, siempre se ha mantenido la parte de bosque igual en los potreros tenemos uno que otro arboles de roble y ahí los mantenemos. (...) La leña, sale de los que han quedado en el potrero porque hay que hacerla entre saca y el potrero tenemos arboles solo nativos entonces se van dejando y lo que queda, es de los sobrantes, también hay un vecino que tiene acacia y le regala leña a mi papá porque es grande la extensión que él tiene entonces dice: “¡vea! Si necesitan leña hay la acacias se caen, recójanlas” entonces recogemos también de allá pero lo que es bosque nosotros no lo tocamos para nada. (...) El fin de mantener la reserva, es porque tenemos bien claro, que los arboles cumplen una función muy importante para el planeta. Entonces la idea de nosotros es conservarlo, pues igual digamos para que el cambio climático tampoco nos afecte mucho, porque sabemos que los arboles también ayudan a descontaminar, todo esos contaminantes que hacen a través de las quemas, de las fábricas. Entonces eso hace que descontamine un poquito el oxígeno que nosotros absorbemos. Entonces la idea es irlo conservando 100%, entre más árboles tengamos mucho mejor” (Golondrin, 2012).

“En cuanto a Bosques, pues se está haciendo la conservación natural, ósea los aislamientos, se está repoblando con especies nativas como umui, nacedero, la misma chacha fruto, la leucaena. Se está haciendo reforestaciones para la conservación de bosques. (...) Sí, es un proceso bastante largo, que nuestra asociación a través de las reservas naturales de la sociedad civil, se continúa con ese proceso de la ampliación de la reservas y los cordones de conectividad biológica también que está incrementando en la zona. Todo esto es concertado también con la parte indígena, nosotros como campesinos y ellos también están en el proceso de conservación y ampliación de la frontera boscosa. (...) Más que todo el beneficio que se está trabajando con la fundación Río Piedras son los canjes ecológicos, ósea que a veces nos apoya con bebederos ecológicos con manguera, nos apoya con batería sanitaria y en fin

una serie de contraprestaciones para conservación del bosque, bonificaciones ambientales.” (Entrevista realizada a Cesar Hidalgo)

Contraste a ello es relevante tomar en cuenta la opinión de los indígenas que también se encuentran asentados en la zona. Tanto para el tema de usos como de conservación de los recursos.

“Se han venido realizando una serie de capacitaciones por medio del cabildo, con diferentes proyectos. Entonces hay muchas formas de manejos de suelos a través de la pendiente con zonas de drenaje, eso es lo que hacemos hasta ahora. (...) Los cultivos a través de la pendiente, es mirar que no haiga escorrentías que se vayan llevando la tierra, por eso se siembra atravesado, las zanjas de drenaje es tomando por los lados para que no haga efecto de arrastre de suelo, para que no haiga escorrentía. Eso lo hacen casi la mayoría de las familias y la topografía del suelo, que eso todo mundo lo hace. (...) Antes se realizaban las quemas, se iniciaban las famosas rosas que se dicen, pero con el pasar del tiempo, eso es una dinámica que ha ido tomando la comunidad en conciencia y ya no se hace. Hoy en día se hace la, nosotros decimos “picar con pala”, tampoco se utiliza el tractor porque saca mucha tierra. En palabras que la comunidad entiende es que, no ara porque sale toda la tierra amarilla, que es la que no produce nada, entonces hoy se maneja con pala, más que todo es picando a pala” (Hernan Dario, 2012).

En cuanto al tema de fertilizantes:

“En un principio se utilizó químicos, con la llegada de nuevos proyecto, de todas la capacitaciones que se han tenido, se ha venido fortaleciendo más que todo la práctica agroambiental, que ya es todo lo que son los abonos orgánicos, lixiviados, lombriz californiana, manejo de lixiviados de los diferentes animales. Que todavía hay gente que tiene monocultivo, claro que sí, pero tampoco es un terreno que sirva para el monocultivo, son más que todo, cultivos pequeños” (Hernan Dario, 2012).

Al respecto de la ganadería Hernán Darío (2012) afirma:

“Se está utilizando en este momento, potreros con manojo de cercas eléctricas, otros con cercas estables, como allá las parcelas son muy pequeñas de 3 a 4 hectáreas todo mundo la tiene casi organizadas, hay algunos que todavía la tienen regadas. Ahora la mayoría casi del sector que está en la cuenca la tiene organizada. (...) De acuerdo al terreno, en eso estamos como cabildo, buscando el uso potencial del suelo, con el INCODER tratando de buscar cuales, porque se supone que a nosotros nos han entregado, tantas hectáreas, pero ellos en el momento de entregarla no se dieron cuenta, de que entregaban globalizado de río a carretera. Nunca se han tomado el trabajo de decir, la finca tal tiene tanto que sirve y tanto que o sirve. Tanto en área de protección, tiene que cumplirse como ley y tanto en área usufructable. Entonces en ese estudio estamos, queriendo organizar como resguardo para poder mirar cual es en fin de la tierra, sé que podemos usufructuar como indígenas de la región”.

De acuerdo al tema de la protección de los recursos naturales como cabildo se piensa que:

“En primera instancia el cabildo ha hecho esto desde siempre. Para que se haya hecho, primero porque anteriormente las fincas llegaban hasta el agua, mejor dicho hasta que se vean las piedras, eso fue lo que hicieron los grandes latifundistas. La misma necesidad hace que tengamos ese tipo de pensamiento, entonces que se hace, se aísla para que haiga regeneración natural la propia de la misma región, en algunas partes ha habido ayuda de algunos proyectos, de algunas agencias para la siembra de árboles y algotros simplemente la han dejado reforestar, la han dejado llenar, muchos dice que de maleza pero no es maleza, es bosque rastrojo, entonces de ahí se ha ido sacando la leña, porque también no había leña. La comunidad vive de eso, tiene que dejar el bosque rastrojo para explotar la leña, cualquier palo y para cualquier cosa es esencial. Entonces eso es lo que hemos venido haciendo como comunidad”. (Hernan Darío, 2012).

Relacionándolo directamente con el tema del agua

“Como comunidad anteriormente no se tenía servicio de acueducto, nosotros no decimos acueducto sino soluciones de agua, hoy tenemos soluciones de agua, entonces hoy trabajamos con el agua, más sin embargo no podemos darle agua a los animales, entonces en algún momento nosotros sacamos con el balde y le damos a la vaca, esperando que no haiga pisoteo sobre la quebrada. (...) la tierra es el cosmos de nosotros, es nuestra visión y misión que hay que tener como comunidad y como pueblo, eso es para nosotros la tierra. Todo lo que te diga territorio es visión para nosotros. Esta debajo en medio y hacia arriba, eso se llama cosmovisión” (Hernan Dario, 2012).