

**CAPTURA DE CARBONO EN RAÍCES FINAS Y ESTRUCTURALES EN BOSQUES
ALTO-ANDINOS Y SISTEMAS AGROFORESTALES EN ASOCIO CON ÁRBOLES
DISPERSOS Y CULTIVOS EN SANTA ISABEL, TOLIMA.**

**DIEGO FELIPE BELTRÁN BARRERA
ADRIANA MARCELA ERAZO GARCÍA**

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Forestal**

Director

**MILENA ANDREA SEGURA MADRIGAL
M.Sc. Socioeconomía Ambiental**

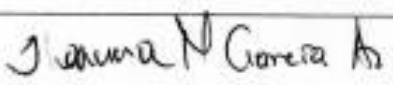
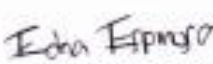
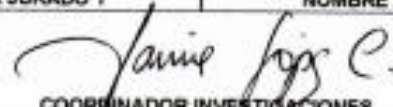
Co - Director

**HERNÁN JAIR ANDRADE CASTAÑEDA
Ph.D Tropical Agroforestry**

**UNIVERSIDAD DEL TOLIMA
FACULTAD DE INGENIERÍA FORESTAL
INGENIERÍA FORESTAL
IBAGUÉ-TOLIMA**

2017

COMITÉ DE INVESTIGACIONES ACTA DE SUSTENTACIÓN TRABAJO DE GRADO (Acuerdo Consejo de Facultad Ingeniería Forestal 355 de 2013)				
TÍTULO DEL TRABAJO DE GRADO Captura de carbono en raíces finas y estructurales en bosques alto-andinos y sistemas agroforestales en asocio con árboles dispersos y cultivos en Santa Isabel, Tolima				
NOMBRE DEL (LOS) ESTUDIANTE(S): Diego Felipe Beltrán Barrera				
DIRECTOR Milena Andrea Segura Madrigal / Jair Andrade Castañeda				
NOMBRE Y NIVEL DE FORMACIÓN JURADO 1 Johanna Magaly García Andrade, MSc.				
CALIFICACIÓN JURADO 1	Informe Escrito (85%)	4.8	Sustentación (35%)	4.7
NOMBRE Y NIVEL DE FORMACIÓN JURADO 2 Luz Amalia Forero Peña, PhD.				
CALIFICACIÓN JURADO 2	Informe Escrito (85%)	4.1	Sustentación (35%)	4.7
CALIFICACIÓN PONDERADA	Jurado 1	4.8	Jurado 2	4.3
CALIFICACIÓN FINAL	4.6	Reprobado		Aprobado
Sobresaliente		Meritorio	X	Laureado
RANGOS DE EQUIVALENCIA: Calificación menor de tres cero (3.0) REPROBADO Calificación entre tres cero (3.0) y tres nueve (3.9) APROBADO Calificación entre cuatro cero (4.0) y cuatro cuatro (4.4) SOBRESALIENTE Calificación entre cuatro cinco (4.5) y cuatro nueve (4.9) MERITORIO Calificación de cinco cero (5.0) LAUREADO				
OBSERVACIONES				

FIRMAS	
 NOMBRE Y FIRMA JURADO 1	 NOMBRE Y FIRMA JURADO 2
 COORDINADOR INVESTIGACIONES	
CIUDAD: <i>ibague</i>	FECHA DE SUSTENTACIÓN: <i>Junio 15 / 2017</i>

COMITÉ DE INVESTIGACIONES ACTA DE SUSTENTACIÓN TRABAJO DE GRADO (Acuerdo Consejo de Facultad Ingeniería Forestal 355 de 2013)				
TÍTULO DEL TRABAJO DE GRADO Captura de carbono en raíces finas y estructurales en bosques alto-andinos y sistemas agroforestales en asocio con árboles dispersos y cultivos en Santa Isabel, Tolima				
NOMBRE DEL (LOS) ESTUDIANTE(S): Adriana Marcela Erazo García				
DIRECTOR Milena Andrea Segura Madrigal / Jair Andrade Castañeda				
NOMBRE Y NIVEL DE FORMACIÓN JURADO 1 Johanna Magaly García Andrade, MSc.				
CALIFICACIÓN JURADO 1	Informe Escrito (65%)	4.8	Sustentación (35%)	4.7
NOMBRE Y NIVEL DE FORMACIÓN JURADO 2 Luz Amalia Forero Peña, PhD.				
CALIFICACIÓN JURADO 2	Informe Escrito (65%)	4.1	Sustentación (35%)	4.7
CALIFICACIÓN PONDERADA	Jurado 1	4.8	Jurado 2	4.3
CALIFICACIÓN FINAL	4.6	Reprobado	Aprobado	
Sobresaliente		Meritorio	X	Laureado
RANGOS DE EQUIVALENCIA: Calificación menor de tres cero (3.0) REPROBADO Calificación entre tres cero (3.0) y tres nueve (3.9) APROBADO Calificación entre cuatro cero (4.0) y cuatro cuatro (4.4) SOBRESALIENTE Calificación entre cuatro cinco (4.5) y cuatro nueve (4.9) MERITORIO Calificación de cinco cero (5.0) LAUREADO				
OBSERVACIONES				

FIRMAS	
 NOMBRE Y FIRMA JURADO 1	 NOMBRE Y FIRMA JURADO 2
 COORDINADOR INVESTIGACIONES	

CIUDAD: Ibagué	FECHA DE SUSTENTACIÓN: Junio 15/2017
----------------	--------------------------------------

DEDICATORIA

A Dios por haberme dado la bendición de llegar hasta este punto, por mi buena salud y por permitirme encontrar grandes y bondadosas personas en este proceso.

A mi madre María por haberme brindado su apoyo incondicional durante todo mi proceso educativo y mi vida en general, por sus consejos, valores inculcados y esa constante motivación para hacer de mí una persona de bien y por sobre todas las cosas por su inmenso amor.

A mi padre Diego porque su memoria y su amor han sido siempre un motivo para lograr mis metas.

A mi hijo Francisco quien es el pilar de mi vida y me inspira a buscar un mejor futuro

ADRIANA MARCELA ERAZO GARCÍA

A Dios, como guía y protección en cada etapa de mi vida.

A mi madre la razón de mi vida y constancia permanente, a quien le debo cada uno de sus esfuerzos y entero compromiso dentro de mi formación, gracias por creer en mí y ser parte de este logro.

A mi padre por su dedicación permanente, comprensión, apoyo económico y compartir este logro conmigo.

A mi hermana por su apoyo incondicional y respaldo en cada uno de mis sueños, mi ejemplo a seguir.

A mi abuela por sus consejos, alegrías y seguir siendo parte fundamental de la familia.

DIEGO FELIPE BELTRÁN BARRERA

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad del Tolima, como alma máter de investigación y conocimiento.

Los ingenieros Hernán J. Andrade y Milena A. Segura por su asesoría en el proceso de planificación, construcción y procesamiento de la información, además de su entera disposición en la guía y desarrollo de ideas.

Al grupo PROECUT en general, quienes hicieron el debido acompañamiento con eficiencia y diligencia.

A la comunidad de Santa Isabel por hacer posible la toma de datos en campo.

Agradecemos a todas aquellas personas que directa o indirectamente hicieron posible la realización de este trabajo de grado.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	13
1. JUSTIFICACIÓN	16
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	18
3. OBJETIVOS	20
3.1. OBJETIVO GENERAL	20
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
4. MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES	21
4.1. EFECTO INVERNADERO	21
4.2. CAMBIO CLIMÁTICO	22
4.3. ESTRATEGIAS QUE FOMENTAN Y FORTALECEN LA MITIGACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO A NIVEL DE COLOMBIA	23
4.4. BOSQUES ALTO-ANDINOS EN COLOMBIA	23
4.5. <i>QUERCUS HUMBOLDTII</i> BONPL. EN COLOMBIA	24
4.6. SISTEMAS AGROFORESTALES EN COLOMBIA	25
4.7. BIOMASA	27
4.7.1. Biomasa aérea.	29
4.7.2. Biomasa bajo suelo.	29
4.8. CICLO DEL CARBONO EN ECOSISTEMAS FORESTALES	29

4.9.	ALMACENAMIENTO Y FIJACIÓN DE CARBONO EN ECOSISTEMAS FORESTALES	30
4.10.	ALMACENAMIENTO DE CARBONO EN RAÍCES FINAS Y ESTRUCTURALES	30
4.11.	SERVICIOS ECOSISTÉMICOS DE LOS BOSQUES ALTO-ANDINOS	31
4.12.	VALORACIÓN DE BIENES Y SERVICIOS AMBIENTALES EN COLOMBIA	32
4.13.	RESERVAS DE CARBONO COMO MITIGACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO	32
5.	METODOLOGÍA	33
5.1.	ÁREA DE ESTUDIO	33
5.2.	CARACTERIZACIÓN DEL SUELO Y USOS DE LA TIERRA	34
5.3.	DISEÑO DE MUESTREO	36
5.4.	ESTIMACIÓN DE BIOMASA EN RAÍCES FINAS Y ESTRUCTURALES	38
5.4.1.	Raíces finas.	39
5.4.2.	Raíces estructurales.	41
5.5.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO	42
5.6.	ESTIMACIÓN DEL IMPACTO DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO EN LAS RESERVAS DE CARBONO	42
6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	44
6.1.	BIOMASA Y CARBONO BAJO SUELO	44
6.1.1.	Biomasa De Raíces Finas.	44
6.2.	CARBONO ALMACENADO EN RAÍCES ESTRUCTURALES	49
6.3.	BIOMASA Y CARBONO RADICULAR TOTAL	50

6.4. ESTIMACIÓN DEL IMPACTO DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO EN LAS RESERVAS DE CARBONO DE LA BIOMASA BAJO SUELO	52
7. CONCLUSIONES	54
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Especies inventariadas para los sistemas bosque y SAF en asociados con árboles dispersos	37
Tabla 2. Biomasa arriba del suelo para el sistema bosques y pasturas en paisajes alto-andinos de Santa Isabel, Tolima – Colombia	41
Tabla 3. Modelos alométricos para calcular biomasa de <i>Quercus humboldtii</i> y bosques alto-andinos en el Páramo de Anaime	41
Tabla 4. Posibles cambios en el almacenamiento de carbono (t CO ₂ e/ha) para la biomasa en raíces por cambios potenciales de uso del suelo	53

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Localización del municipio de Santa Isabel, Tolima y coordenadas geográficas de las coberturas (bosque y pastura)	34
Figura 2. Procedimiento para el muestreo de raíces en campo en ecosistemas Alto-andinos de Santa Isabel, Tolima, Colombia	40
Figura 3. Carbono almacenado en biomasa de raíces finas (media \pm error estándar) a una profundidad de 0 a 50 cm respectivamente en paisajes alto-andinos de Santa Isabel, Tolima – Colombia	44
Figura 4. Carbono almacenado (media \pm error estándar) a diferentes profundidades en bosques nativos, SAF en asocio con árboles dispersos y cultivos en ecosistemas alto-andinos de Santa Isabel, Tolima – Colombia	46
Figura 5. Carbono almacenado en biomasa de raíces estructurales (media \pm error estándar) para el sistema bosques y SAF en asocio con árboles dispersos de paisajes alto-andinos de Santa Isabel, Tolima – Colombia	49
Figura 6. Carbono almacenado en biomasa de sistemas radiculares en bosques nativos, SAF en asocio con árboles dispersos y cultivos en ecosistemas alto-andinos de Santa Isabel, Tolima – Colombia	51

RESUMEN

Las raíces finas (diámetro < 2 mm) se han caracterizado por ser un componente radicular importante dentro de la absorción de nutrientes y dinámica del carbono. Se evaluó la captura de carbono en raíces finas mediante un diseño completamente al azar con tres tratamientos (bosques, cultivos y pasturas); del mismo modo se utilizó un diseño con arreglo en franjas (profundidad: 0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50 cm) y cinco repeticiones. Se colectaron bloques de 10 x 10 x 10 cm que fueron lavados y tamizados para separar las raíces finas y secadas hasta peso constante. La biomasa de raíces estructurales se estimó con la ecuación desarrollada por Cairns et al. (1997). Se encontraron diferencias estadísticas ($p < 0,05$) en la acumulación de carbono entre sistemas: mayor en bosques que en pasturas y cultivos (raíces finas: $4,2 \pm 0,6$ vs $2,1 \pm 0,4$ vs $0,6 \pm 0,25$ t/ha, y estructurales: $26 \pm 2,8$ vs $10 \pm 0,9$ t/ha, respectivamente). La profundidad tiene un efecto significativo ($p < 0,05$) en la acumulación de carbono en raíces finas, siendo mayor en las primeras capas y reduciéndose en las profundas: 55% del carbono se encuentra en los primeros 20 cm del suelo y 12% entre 40-50 cm. Los agentes fisicoquímicos que caracterizan la cobertura del suelo determinan el crecimiento y desarrollo de las raíces. La conservación de bosques nativos implica la retención de cantidades importantes de carbono que al reportar un cambio de uso del suelo podría generar un incremento en las concentraciones de CO₂ a la atmósfera.

Palabras claves: Almacenamiento de carbono, Biodiversidad, Biomasa, Servicios ambientales.

ABSTRACT

Fine roots (diameter < 2 mm) has been characterized as a mean root component in nutrient absorption and carbon dynamics. Carbon sequestration was evaluated inside fine roots through a completely random design with three treatments such as forests; crops and pastures. Similarly, It was applied a design with pursuant slots (depth: 0-10; 10-20; 20-30; 30-40; 40-50 cm) and five repetitions. Blocks were collected of 10 x 10 x 10 cm in dimension which were washed and sifted in order to separate the fine roots and dried them until constant weight. Structural root's Biomass was estimated with the equation developed by Cairns et al. (1997). It was found statistic differences ($p < 0,05$) on the accumulation of carbon between systems: higher in forests than pastures and crops (fine roots : $4,2 \pm 0,6$ vs $2,1 \pm 0,4$ vs $0,6 \pm 0,25$ t/ha and structural ones: $26 \pm 2,8$ vs $10 \pm 0,9$ t/ha, respectively). Depth has a significant effect ($p < 0,05$) on the increasing of carbon at fine roots being higher on the first layers and decreasing at the last ones: 55% of carbon is found in the first 20 cm of the soil and 12% between 40-50 cm. Physicochemical agents that characterize the soil coverage determine the growth and development of roots. Consequently, native forests preservation implies retention of important amounts of carbon since it shows a change on the use of soil could produce an increase on the concentrations of CO_2 at the atmosphere.

Keywords: Carbon storage, Biodiversity, Biomass, Environmental services

INTRODUCCIÓN

Uno de los principales problemas dentro del cambio climático, el cual converge en cada uno de los aspectos socioeconómicos, políticos y ambientales por la búsqueda de garantías en la seguridad humana y la conservación de los recursos naturales, es el fenómeno del calentamiento global (Saavedra, 2010). El llamado forzamiento radiactivo es producido por el incremento en la concentración de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, entre los que se encuentran el dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido de nitrógeno (NO_2) y los clorofluorocarbonos (CFC), la mayoría de dichos gases se producen de forma natural, pero el aumento desmedido en su concentración atmosférica se debe a las diferentes actividades antrópicas. El primero de ellos es el más abundante ya que gran parte proviene del cambio en el uso de la tierra, la deforestación en zonas tropicales, el uso de combustibles fósiles y la producción de cemento en países desarrollados, a parte es un GEI denominado de larga vida por ser químicamente estable y su persistencia en la atmósfera que va desde décadas a siglos y más (IPCC, 2007).

Se ha considerado que, en el corto plazo, las actividades relacionadas con el uso del suelo, el cambio de uso de la tierra, y las actividades agrícolas y forestales, pueden jugar un papel importante en la reducción del CO_2 atmosférico (FAO, 1999; Watson et al., 2000). Esto se debe a que en condiciones adecuadas los bosques y suelos agrícolas pueden actuar como sumideros de CO_2 ; a partir de allí es importante definir la capacidad de almacenamiento de carbono y las emisiones de CO_2 , las cuales permitan obtener un balance entre las diferentes aptitudes de uso del suelo y el carbono secuestrado por el mismo (FAO, 1999).

La biomasa es el parámetro principal en la estimación del carbono liberado a la atmósfera o conservado y fijado en determinadas superficies (Brown, Sathaye, Cannell y Kauppi, 1996), los cuales representan una relevancia actual debido a sus implicaciones en relación al cambio climático (Ciesla, 1996; Brown, 1996).

Las funciones de las raíces están relacionadas con los tejidos que las conforman, el tamaño y características morfológicas de las mismas (Megias, Molist y Pombal, 2015). El sostén, la conducción de nutrientes y la mayor parte de la fijación de carbono bajo suelo, está a cargo de las raíces que presentan principalmente tejido secundario, mientras que la absorción de nutrientes y del agua están relacionadas con las raíces que presentan tejido primario (Flores, 1999). Estas últimas son comúnmente denominadas raíces finas y se han caracterizado por ser una de las estructuras más dinámicas y activas de la planta (Jiménez y Arias, 2004).

Así mismo, las raíces finas no solo son importantes por su labor de adquirir recursos para las plantas, sino también por el almacenamiento de carbono y los ciclos biogeoquímicos (Burke y Raynal, 1994; Sanford y Cuevas, 1996; Barreto y León, 2005).

Se ha considerado que el suelo, en su conjunto, constituye un sumidero de carbono, de materia orgánica y nutrientes, que contribuyen a la recuperación de la biomasa aérea en el proceso sucesional (Imber, Blanco y Castillo, 2004). Esto se logra debido al efecto de las raíces sobre las propiedades del suelo, pues la perturbación no es tan severa como lo es para la biomasa aérea en estudios de secuestro de carbono (Sierra, Del Valle y Orrego, 2001).

Uno de los tipos de bosque alto-andinos para Colombia son los robledales, usualmente dominados por *Quercus humboldtii* Bonpl; para los cuales el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT) estableció una veda a nivel nacional para su aprovechamiento forestal (Resolución 096 de 2006). La importancia de esta especie arbórea recae en el aporte que pueda generar como sumidero de carbono, lo cual se puede dar a través de dos procesos; “reducción de emisiones antropogénicas de CO₂ o creación y/o mejoramiento de los sumideros de carbono en la biósfera. La forestería puede contribuir a la mitigación del calentamiento global mediante la conservación, el secuestro, almacenamiento y la sustitución de carbono (Vine, Sathaye y Makundi, 1999; IPCC, 2001).

Según Dixon (1995), los sistemas agroforestales permiten reducir las emisiones de GEI a partir de la acumulación de carbono en cuatro componentes: biomasa sobre el suelo, hojarasca, sistemas radiculares y carbono orgánico del suelo (Snowdon et al., 2001). Se hace necesario aclarar que los GEI han aumentado su concentración en la atmósfera desde el inicio de la revolución industrial debido a las actividades humanas y como una parte de estos se denominan de larga vida, es solo hasta el siglo 20 que empiezan a causar el forzamiento radiativo (IPCC, 2007).

Existiendo un vacío en la información sobre la concentración de carbono a partir de los diferentes sistemas de uso del suelo (bosque, pastura y cultivo) de la región norte del Tolima, es importante desarrollar un estudio que permita comparar la capacidad de retención de carbono del sistema radical bajo la dinámica del paisaje alto-andino como una alternativa hacia la conservación y mantenimiento de los relictos de bosque de roble establecidos en la zona.

1. JUSTIFICACIÓN

Uno de los mayores problemas tratados desde el siglo XX es el abrupto cambio climático, consecuencia del incremento en la concentración de GEI en la atmósfera; este incremento se ha acentuado debido a acciones antrópicas (Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2007). Comúnmente se habla del CO₂, ya que es el principal GEI, y se afirma que debido a su incremento en la atmósfera se han inducido eventos climáticos extremos, como inundaciones y huracanes, lo cual ha causado pérdidas tanto económicas como sociales (IPCC, 2001).

Esta problemática lleva a la creación de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC, 1994) y la adopción del Protocolo de Kyoto en 1997. Este protocolo planteó estrategias para reducir las emisiones de GEI mediante mecanismos flexibles, como el Mecanismo para un Desarrollo Limpio (MDL), la Implementación Conjunta y el Comercio de Emisiones, en los cuales se puede incluir al uso del suelo y cambio de uso del suelo mediante la captura de carbono en biomasa forestal y suelos (UNFCCC, 2008).

Los bosques colombianos ubicados en la región andina, el páramo y los humedales contienen importantes reservas globales de carbono (Cuesta, Bustamante, Becerra, Postigo y Peralto, 2012). La zona andina está ocupada en mayor parte por robledales y su especie más representativa (*Quercus humboldtii* Bonpl.) es considerada de gran importancia forestal para todo el territorio colombiano, debido a los diversos beneficios que brinda a las comunidades (Pérez, Villalba y Almanza, 2013). El estado de conservación de estos ecosistemas depende de varias estrategias de intervención sumado al establecimiento de áreas de conservación y vedas (Devia y Arenas, 2000; Cárdenas y Salinas, 2007). Dada la relevancia ecológica y económica de los bosques de roble, estrategias para su estudio y conservación tienen impacto no solo para ésta sino en todo el ecosistema, ya que estos árboles crecen junto a una gran cantidad de especies (Palacio y Fernández, 2006). Doll, Vallejos, Bilbao y Jara (2008) afirman que existe

información limitada de la biomasa en algunos ambientes y ecosistemas tipos forestales, siendo aún más escasas las mediciones de estos componentes bajo suelo y la necromasa. Es necesario realizar estimaciones precisas de la biomasa del sistema radical (Vogt, D., Vogt, K. y Bloomfield, 1998; Sánchez y Eaton, 2001), ya que la biomasa albergada en dicho sistema juega un rol predominante en la dinámica del carbono bajo el nivel del suelo (Jackson, Mooney y Schulze, 1997; Gayoso y Guerra, 2005). De la misma forma, al senescer, las raíces incorporan carbono orgánico del suelo, lo cual incrementa la importancia de este componente en el ciclo global de carbono (Andrade, Espinosa y Moreno, 2014).

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los bosques alto-andinos han sufrido grandes transformaciones debido a la ampliación de la frontera agrícola. Las quemadas periódicas, llevadas a cabo para favorecer el rebrote de los pastos, impiden la recolonización del bosque, la cual de por sí es muy lenta dadas las condiciones limitantes de temperatura (Romero, 2012). Además, se mantiene una marcada tendencia a la degradación y contaminación de los suelos con el uso intensivo de productos agroquímicos, fertilizantes, plaguicidas y el riego, que lleva a la pérdida de nutrientes y la degradación del suelo (Hofstede, 2002).

Entre los ecosistemas andinos relevantes se identifican los bosques de roble (*Quercus humboldtii* Bonlp.), la cual es una especie nativa apreciada por la población dada la calidad de su madera y los servicios ambientales que presta pero que se encuentra altamente amenazada (Díaz, 2010). Estos bosques, y específicamente esta especie, presentan problemas de reducción de área, ya que sus poblaciones han sido fuertemente afectadas por presiones originadas por la explotación forestal desmedida para la obtención de madera y carbón vegetal y la ampliación de la frontera agrícola (González y Parrado, 2010).

Por ser uno de los paisajes naturales con mayor amenaza, presión y grado de fragmentación (Armenteras y Morales, 2003), se han planteado políticas de protección y conservación para disminuir su transformación y reducción. Estas acciones incluyen el Decreto 2811 de 1974 y posterior ampliación con la Resolución N° 096 (2006) del Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Dentro de los componentes que almacenan carbono en un ecosistema forestal, las raíces son una parte importante del flujo y balance de carbono, ya que grandes cantidades se transfieren al suelo por esta vía, debido a su proceso de senescencia (Andrade, Brook, e Ibrahim, 2008). La estimación de biomasa de raíces es importante en proyectos de fijación de carbono, ya que éstas representan entre un 10 y 40% de la biomasa total de

la planta (Ramos, 2003). Sin embargo, la información disponible y las investigaciones son escasas sobre el almacenamiento de carbono en raíces estructurales y finas, principalmente para este tipo de ecosistemas forestales en Colombia.

Por esa razón, se hace necesario realizar estudios que ofrezcan resultados tangibles de la contribución de este importante componente de la biomasa en este tipo de ecosistemas, para mitigar el cambio climático y para la protección de las fuentes hídricas. Por otra parte, las comunidades aledañas conocerán cómo contribuyen sus bosques a iniciativas de conservación y sostenibilidad ambiental a nivel local, regional, nacional y para el Mundo.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Estimar el almacenamiento de carbono en raíces finas y estructurales de bosques alto-andinos y sistemas agroforestales en asocio con árboles dispersos y cultivos del municipio de Santa Isabel, Tolima, Colombia.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Cuantificar el carbono almacenado bajo suelo de los robledales de *Quercus humboldtii* Bonlp. y sistemas agroforestales en asocio con árboles dispersos y cultivos referenciados a estos paisajes alto-andinos.
- Determinar la distribución de la reserva de carbono en raíces finas a medida que se profundiza en el perfil del suelo.
- Estimar el impacto del cambio de uso del suelo en las reservas de carbono de la biomasa bajo suelo en ecosistemas alto-andinos.

4. MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES

4.1. EFECTO INVERNADERO

Según Benavides y León (2007), la absorción de energía de un gas depende de que la radiación electromagnética sea similar a la frecuencia vibracional molecular del gas; cuando un gas absorbe energía lo que sucede es que se transforma en movimiento molecular interno, este movimiento es el causante de un aumento en la temperatura. El IPCC (2001) afirma que los GEI absorben de manera eficaz la radiación infrarroja emitida por la superficie terrestre, la atmósfera y las nubes; posteriormente, dicha radiación es emitida en todas las direcciones particularmente a la superficie de la tierra, por ello se afirma que estos gases retienen calor entre la superficie de la tierra y la tropósfera, lo cual se denomina efecto invernadero.

El Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno de El Niño (CIIFEN) 2015 afirma que el efecto invernadero es un fenómeno atmosférico natural el cual permite tener una temperatura adecuada en el planeta, ya que retiene parte de la energía proveniente del sol. El problema yace en que por medio de las actividades humanas se liberan grandes cantidades de carbono a un ritmo mucho mayor al cual puede ser absorbido (IPCC, 2007). Estas actividades antropogénicas y el aumento de las emisiones de carbono en la atmósfera propician cambios en el clima lo cual trae como consecuencia, ascenso del nivel del mar, cambios en las precipitaciones, desaparición de bosques, extinción de organismos y problemas en la agricultura (CIIFEN, 2015).

La radiación atmosférica tiene una estrecha relación con la temperatura, dependiendo del nivel o altitud en el cual se emita; en la tropósfera, la temperatura disminuye a medida que se aumenta la altura (IPCC, 2001).

El efecto invernadero se fortalece por determinados cambios en la concentración atmosférica de los ya mencionados GEI y aerosoles, los cuales afectan la absorción,

dispersión y emisión de la radiación dentro de la superficie terrestre (Benavides y León, 2007); De esta forma, se tiene que el calentamiento o enfriamiento global depende de si el balance energético dado por los factores de forzamiento radiactivo tiene un resultado positivo o negativo (Benavides y León, 2007).

4.2. CAMBIO CLIMÁTICO

Según la UNFCCC (1992), el cambio climático se define como una alteración en el clima que se atribuye de forma directa o indirecta a las diferentes actividades humanas que puedan alterar la composición atmosférica mundial y que se da ligada a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables.

Arriaga y Gómez (2007) mencionan que con el paso de los años se ha notado que el cambio climático va creciendo, lo cual causa que muchos ecosistemas no tengan el tiempo suficiente para adaptarse y se ven forzados a desaparecer. Estos mismos autores anotan que la problemática ha recibido dos acciones de respuesta: una de ellas basada en la implementaciones de actividades de adaptación y la otra en actividades de mitigación viendo mayor factibilidad económica y social en la segunda.

Las moléculas de los GEI tienen la capacidad de absorber y reemitir las radiaciones de onda larga que provienen del sol y la que refleja la superficie de la tierra hacia el espacio, controlando el flujo de energía natural a través del sistema climático; de esta manera el clima se ajusta a los incrementos en las concentraciones de los gases, los cuales generan un aumento de la radiación infrarroja absorbida por los GEI en la capa inferior de la atmósfera, en orden a mantener el balance energético de la misma (CIIFEN, 2015).

Este ajuste genera una variación en el clima, el cual se manifiesta en un aumento de la temperatura global que a su vez generará un incremento en el nivel del mar, cambios en los regímenes de precipitación y en la frecuencia e intensidad de los eventos climáticos

extremos, incluyendo cambios en la dinámica de la agricultura, el recurso hídrico y la salud humana (Benavidez y León, 2007).

4.3. ESTRATEGIAS QUE FOMENTAN Y FORTALECEN LA MITIGACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO A NIVEL DE COLOMBIA

Las estrategias que fomentan la mitigación del cambio climático para Colombia son: La producción y uso eficiente de la energía, la diversificación y promoción del uso de energías no convencionales, el mejoramiento del servicio de sistemas integrados de transporte masivo, la masificación del uso de combustibles limpios como gas natural, el desarrollo de proyectos forestales, las compensaciones a países que reduzcan las emisiones de CO₂, la protección y ampliación de los bosques, la producción de bioenergía a partir de residuos agrícolas y cultivos novedosos, la promoción de sistemas agroforestales. Además, mencionan estos mismos autores otras estrategias como la identificación y el desarrollo de capacidades para promover un portafolio de proyectos de calidad que sean competitivos en el mercado internacional de carbono, el diseño y desarrollo e implementación de una estrategia de mercadeo de proyectos nacionales para este mismo mercado y por último la identificación, formulación y desarrollo de proyectos de Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) en los distintos sectores (Ministerio del Medio Ambiente e Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), 2010).

4.4. BOSQUES ALTO-ANDINOS EN COLOMBIA

De acuerdo con el sistema de clasificación de zonas de vida de Holdridge para Colombia (Gulh y Leyva, 1997), en el sistema de páramos y bosques alto-andinos existen cuatro zonas de vida: bosque muy húmedo premontano (bmh-PM), bosque húmedo montano bajo (bh-MB) o tierra cafetera húmeda, bosque muy húmedo montano bajo (bmh - MB) o tierra fría muy húmeda y bosque pluvial montano (bp-M), en las partes altas del sistema, por encima de los 3000 m de altitud (Corantioquia, 1997).

Estos ecosistemas cumplen funciones específicas, tal como son la regulación del flujo hídrico que desciende de los páramos y la acumulación y administración de sus nutrientes, que albergan árboles hasta de 15-20 m de altura los cuales resguardan y alimentan una amplia e importante variedad de especies animales y vegetales endémicas de la región (Romero, 2012).

Según Romero (2012), en América Latina y el Caribe la sostenibilidad ambiental del desarrollo está cada vez más en riesgo. La problemática de la región se evidencia en la degradación de los terrenos y los bosques, la deforestación y con ello la pérdida de los hábitats y biodiversidad (Tudela, 2000). En términos específicos, Colombia es uno de los países más diversos del planeta; aunque gran parte de sus ecosistemas y hábitats están gravemente alterados, lo cual trae consigo el deterioro de los servicios ambientales (Kattan, 1997).

A lo largo de los últimos 25 años, es posible relacionar un 50% de área transformada dentro del territorio colombiano pese a los procesos de cambio del uso del suelo y ampliación de la frontera agrícola (Márquez, 2001). Colombia cuenta con 61 millones de hectáreas de bosques, que equivalen al 53% del territorio continental y debido a su importancia ecológica y productiva, se estima que el 62% de la región andina se encuentra degradada, delimitando un área del 29% para bosques andinos (Victorino, 2011).

4.5. QUERCUS HUMBOLDTII BONPL. EN COLOMBIA

El roble común (*Quercus humboldtii* Bonpl.) es una especie característica de los Andes colombianos que crece en asociaciones con numerosas especies de flora y fauna (Palacio y Fernández, 2006). Generalmente, esta especie se desarrolla a temperaturas entre 16 y 24°C, con una precipitación anual promedio de 1500 y 2500 mm/año, humedad relativa de 40 a 70% y se encuentra a un rango altitudinal entre 1900 y 3200 m (Nieto y Rodríguez, 2006). Según la clasificación de la UICN para Colombia, esta especie se encuentra en la categoría vulnerable (rápida reducción en tamaño poblacional VU A2

cd), debido a que se encuentra actualmente en un grado avanzado de amenaza por una la alta tasa extracción maderera (UINC, 2003).

De acuerdo con Avella, López y Nieto (2014) los robledales de la cordillera oriental de Colombia (Santander y Boyacá) corresponden a la asociación de individuos de *Quercus humboldtii* y *Alchornea grandiflora*; para los cuales se evaluó la dinámica del carbono con existencias de 154 t/ha, las cuales corresponden a 77 t C/ha y la tasa de acumulación promedio anual para estos bosques fue de 2.9 t C ha/año, las cuales corresponden a 1.45 t C ha/año.

De acuerdo al estudio realizado por Segura (1997) en la región de Villa Mills, Costa Rica, la cantidad de carbono almacenado para *Quercus costaricensis*, en un bosque pluvial montano con manejo silvicultural es de 56,26 t C/ha.

4.6. SISTEMAS AGROFORESTALES EN COLOMBIA

Los SAF son formas de uso de la tierra que incluyen leñosas perennes que interactúan con cultivos y/o ganado (Nair, 1993a; Somarriba, 1992). El papel destacado de los sistemas forestales y agroforestales en el flujo y almacenamiento a largo plazo de carbono en la biosfera terrestre ha incrementado el interés mundial en estas opciones de uso del suelo para estabilizar el GEI (FAO, 2001). Las evaluaciones preliminares sugieren que los SAF pueden ser sumideros de CO₂ (Albrecht y Kandji, 2003; Montagnini y Nair, 2004; Oelbermann, Voroney y Gordon, 2004; Soto-Pinto et al., 2010; Segura y Andrade, 2012).

El servicio ambiental de captura de carbono es uno de los temas de mayor interés en los últimos años a partir de los logros del Protocolo de Kioto (Del Olmo y Martín, 2004). Aunque la mayor parte de las discusiones y estudios científicos se orientan hacia el papel de los bosques y cultivos forestales; un nuevo interés se desarrolla a partir del papel que cumplen las raíces de los pastos mejorados en la captación de este servicio en relación a los sistemas silvopastoriles basados en rumiantes (Guimarães, Leandro, Pulrolnik,

Vilela y Pereira, 2010). Estos sistemas permiten mejorar la producción y proveer servicios ecosistémicos cuando son diseñados y manejados adecuadamente (Carmona, Bolívar y Giraldo, 2004; Ibrahim et al., 2007).

Según Dixon (1995), estos sistemas aportan dos beneficios principales para conservar carbono; primero contribuyen al almacenaje directo de carbono a corto y mediano plazo en los árboles y el suelo, y segundo reducen indirectamente la emisión de los GEI causada por la deforestación y la agricultura migratoria.

Particularmente, los pastos naturales alto-andinos cubren grandes extensiones de terreno y no han merecido tanta atención investigativa como los bosques (Yaranga y Custodio, 2003). Sin embargo, las pasturas representan un gran potencial no explotado para atenuar el cambio climático, mediante la acumulación de CO₂, que sí es bien manejado podría ser más importante en la generación de créditos de carbono (Albrecht y Kandji, 2003; Andrade et al., 2014).

Algunas prácticas de ganadería extensiva pueden contribuir a un aumento en los depósitos de carbono del suelo debido a la dinámica de las raíces finas por defoliación y mineralización de la materia orgánica que permite la fijación del CO₂ durante las actividades agropecuarias (Andrade et al., 2014).

El uso de algunas prácticas agrícolas son importantes alternativas para la acumulación o captura de carbono, especialmente en suelo y biomasa, creando condiciones favorables de fertilidad y efectos positivos sobre la productividad y sostenibilidad del ecosistema; estas prácticas incluyen el uso de adecuado de técnicas de labranza y buen uso de las unidades de paisaje como bosques, rastrojos y humedales (Orjuela, Ramírez y Andrade, 2010). A medida en que se conocen más en detalle las bondades de estas prácticas, es posible que se reoriente su manejo actual y se masifique su aplicación como aporte a la mitigación del calentamiento global; lo cual implica además el reconocimiento del valor económico de la captura y almacenamiento de carbono como servicio ambiental (Ospina, 2006). El carbono del suelo en tierras de pastoreo es estimado en 70 t/ha, cifra

similar al cantidades almacenado en los suelos forestales (Trumbmore, Davidson, Barbosa de Camargo, Nepstad y Martinelli, 1995).

Pandey (2002) menciona que a pesar de los diversos tipos de SAF que se practican a nivel mundial, su aplicación es más extendida en los trópicos. Este mismo autor indica que aproximadamente el 20% de la población mundial (1200 millones de personas), dependen directamente de los productos agroforestales y de sus servicios en los países en desarrollo. Dada su importancia y uso generalizado, una cuestión importante que debe abordarse es si la agroforestería aplicada pudiera satisfacer las demandas locales, además de promover la captura y almacenamiento de carbono, para obtener beneficios económicos, y ayudar a mitigar la acumulación de CO₂ en la atmósfera (Sánchez, 1995; Nair, 2004; Andrade et al., 2014).

Estudios realizados por Dixon (1995), revelan que el almacenamiento de carbono en SAF, incluyendo el orgánico del suelo, oscila entre 12 y 228 t/ha y que el potencial para la acumulación a través de la biomasa es mayor en el trópico húmedo. Mientras tanto, Alegre, Smyth, Weber y Bandy (1999) encontraron que los cultivos de árboles basados en sistemas de multiestratos alcanzan el 20-46% del carbono secuestrado en bosques primarios comparado con solo 10% de los sistemas de cultivos anuales o bi-anuales.

4.7. BIOMASA

La biomasa es un parámetro que define la capacidad de los bosques para acumular materia orgánica y carbono (FAO, 2000), compuesta por la parte aérea y la subterránea (Fonseca, Alice y Rey, 2009). Su acumulación se produce cuando la cantidad de CO₂ fijado en el proceso de fotosíntesis, es exactamente igual a la cantidad de energía liberada durante la respiración y hasta un límite en el cual un aumento en la intensidad de la luz, no ocasiona un aumento en la tasa fotosintética; dentro de los cuales dependen de la especie, el tipo de follaje del árbol, condiciones ambientales, nivel de nutrientes disponible y potencial hídrico (Vásquez, 1987).

Según Brown (1997b); Eamus, McGuinness y Burrows (2000) la biomasa es empleada para caracterizar la capacidad de un ecosistema para acumular materia orgánica a largo plazo, dicho parámetro se compone por el peso de la materia orgánica aérea y subterránea del ecosistema forestal. La importancia de la biomasa radica en la cuantificación de la cantidad de nutrientes en las diferentes partes de la planta; al estimar la biomasa, es posible cuantificar la fijación de carbono (Dixon, Schroeder y Winjom, 1991; Begon, Harper y Twonsend, 1996; Andrade e Ibrahim, 2003).

Aunque la mayor proporción de biomasa bajo el suelo se encuentra en las raíces estructurales, la mayoría de los protocolos de monitoreo considera solo las raíces finas, ya que son las más dinámicas (MacDiken, 1997; Snowdon et al., 2001). Esto se debe a que una de las estimaciones más empleadas en la obtención de la biomasa de raíces estructurales se realiza por medios destructivos (Böhm, 1979).

El cálculo de la biomasa es el primer paso para evaluar la productividad de los ecosistemas y la contribución de los bosques en el ciclo global del carbono (Parresol, 1999). Existen dos formas de estimarla; ya se por el método directo el cual es destructivo y consiste en cortar el árbol y pesar cada componente del individuo directamente o por el método indirecto que se fundamenta en calcular la biomasa a través de ecuaciones y modelos matemáticos obtenidos por análisis de regresión entre las variables colectadas en terreno y de inventarios forestales (Brown, 1997a). Los ecosistemas boscosos pueden funcionar como importantes sumideros de carbono debido a la cantidad de carbono acumulado en los diversos tipos de biomasa (IPCC, 2001). En términos generales, el carbono en los bosques se encuentra almacenado en diferentes compartimientos: Biomasa viva (aérea y bajo suelo), Materia orgánica muerta (Biomasa de mantillo y de madera muerta) (IPCC 2007).

4.7.1. Biomasa aérea. Toda la biomasa viva que se encuentre sobre el suelo, con inclusión de tallos, tocones, ramas, corteza, semillas y follaje (IPCC, 2003). En cuanto a la biomasa aérea total se refiere al peso seco del material de los árboles con dap >10 cm; incluyendo fustes, corteza, ramas y hojas (Dauber, 2006).

4.7.2. Biomasa bajo suelo. Toda la biomasa viva de raíces, excluyendo raíces finas de menos de 2 mm de diámetro, porque con frecuencia no se pueden distinguir empíricamente de la materia orgánica del suelo (IPCC, 2003).

4.8. CICLO DEL CARBONO EN ECOSISTEMAS FORESTALES

El ciclo del carbono es un proceso dinámico, el cual tiene diferentes fases como la fijación del CO₂ atmosférico a través de los procesos de la fotosíntesis realizados por las plantas y ciertos microorganismos; en este proceso, el CO₂ y el agua reaccionan, ayudados por la radiación solar, para formar carbohidratos y liberar oxígeno a la atmósfera (CIIFEN, 2012). Parte del carbohidrato se consume directamente para suministrar energía a la planta y el CO₂ así formado se libera a través de sus hojas o de sus raíces; otra parte es consumida por los animales que también respiran y liberan CO₂ (Smith et al., 1993). Las plantas y los animales mueren y son finalmente descompuestos por microorganismos del suelo lo que da como resultados que parte del carbono en sus tejidos se oxide en CO₂ y regrese a la atmósfera (Smith et al., 1993; Schimel, 1995). Parte de este carbono en necromasa se puede incorporar al suelo para incrementar su contenido (Andrade et al., 2014).

Los bosques almacenan grandes cantidades de carbono en su biomasa, tanto en los componentes aéreos (tronco, ramas y hojas), como subterráneos (raíces finas y gruesas); igualmente, estos ecosistemas acumulan carbono orgánico del suelo mediante su aporte orgánico a través de la necromasa; por tanto, los bosques son considerados como sumideros, puesto que hacen transferencia neta de CO₂ de la atmósfera a la vegetación y al suelo, donde son almacenados (Huges, Kauffman y Jaramillo, 1999).

4.9. ALMACENAMIENTO Y FIJACIÓN DE CARBONO EN ECOSISTEMAS FORESTALES

El almacenamiento de carbono hace referencia a la cantidad de este elemento que se encuentra en un ecosistema vegetal, en un determinado momento (Scheinbaum, 2004). Tiene en cuenta criterios como tipo de bosque o vegetación, densidad de la madera, factores de ajuste que se basan en datos de biomasa calculada a partir de los volúmenes por hectárea de inventarios forestales (Segura, 1997).

La fijación se refiere al flujo de carbono dentro de una unidad de área cubierta con vegetación, en un lapso de tiempo dado y su cuantificación permite predecir el comportamiento del carbono en cualquier momento durante el crecimiento de la población; este tipo de carbono depende de las características de la especie, las tasas de crecimiento y la longevidad, así como también de las condiciones del sitio, como localización, clima y rotación (Ortiz y Riascos, 2006).

4.10. ALMACENAMIENTO DE CARBONO EN RAÍCES FINAS Y ESTRUCTURALES

Según Cairns, Brown, Helmer y Baumgardner (1997) cuando se cuantifica biomasa se debe tener en cuenta que esta integra dos tipos, la aérea y bajo suelo, esta última se divide en raíces finas y gruesas; las primeras con un diámetro < 2 mm, las cuales representan una alta contribución a la biomasa total de un bosque aunque con una tasa de recambio lenta. Las raíces finas son el componente más activo de la biomasa bajo suelo en términos de su dinámica (producción y mortalidad), ciclaje de carbono, nutrientes y adquisición de recursos (Hooker, Hendrick y Atkinson, 2000). En algunas ocasiones, este tipo de raíces se excluyen porque con frecuencia no se pueden distinguir empíricamente de la materia orgánica del suelo o mantillo (Klinge, 1973; Coutts, Nielsen y Nicoll, 1999; Andrade et al., 2008). Las raíces gruesas o estructurales son principalmente de soporte y almacenan también grandes cantidades de carbono (Sierra et al., 2001).

La estimación del servicio ambiental de captura de carbono requiere el cálculo de la biomasa total, la necromasa y el carbono orgánico almacenado en el suelo (Salgado, 2010). Algunos casos de medición de carbono almacenado en bosques de roble han estimado valores desde 67,5 a 139,9 t/ha (Pérez y Díaz, 2010b; Agudelo, 2009). Según Mojica (2013) en bosques del subpáramo, el carbono almacenado en biomasa aérea es superior (117 t/ha) a otros tipos de bosques (86,7 y 25,0 t/ha para bosques maduros y rastrojos, respectivamente); este bajo almacenamiento de carbono puede justificarse por las actividades antropogénicas que han modificado la estructura de los bosques, causando su fragmentación. La conservación de robledales en corredores y su regeneración permitirán mejorar la conectividad de los ecosistemas subandinos, de tal forma que se incremente en conjunto la captura del carbono (Agudelo, 2009).

Amézquita, Murgueitio, Ibrahim y Ramírez (2008) reportaron para bosques nativos y áreas de regeneración natural de 3,3 años de formación a partir de pasturas degradadas valores de carbono total almacenado en raíces finas hasta 1 m de profundidad de 5,6 y 2,7 t/ha, respectivamente. Hasta los 20 cm de profundidad del perfil, se acumula una biomasa similar para los dos rangos de diámetro de raíces, pero diferencialmente distribuidas en profundidad (Doll et al., 2008). Esta distribución de las raíces de distinto diámetro tiene relación con la función específica de las mismas, siendo las raíces finas las más eficientes en absorción de agua y nutrientes, cuya disponibilidad es mayor en los estratos más superficiales (Claus y George, 2005).

4.11. SERVICIOS ECOSISTÉMICOS DE LOS BOSQUES ALTO-ANDINOS

Las zonas de alta montaña prestan importantes servicios ambientales globales como aquellos derivados de la conservación de la biodiversidad, la regulación hídrica, el almacenamiento de carbono, la preservación de la fertilidad de los suelos, el ciclaje de nutrientes, la absorción de contaminantes, la polinización de cultivos, provisión de madera, ornamentación y belleza escénica, entre otros (Barrantes, 2001; Higuera, 2008; Orwa, Mutua, Kindt, Jamnadass, y Anthony, 2009; Agudelo, 2009; Pérez y Díaz, 2010; Romero, 2012).

4.12. VALORACIÓN DE BIENES Y SERVICIOS AMBIENTALES EN COLOMBIA

El valor del bosque como fijador y almacenador de carbono es ampliamente conocido, aunque su conceptualización como oferente de un servicio ambiental solo ha aparecido cuando la conciencia del papel de las emisiones de CO₂ en el cambio climático ha empujado a la firma de acuerdos internacionales y a la ejecución de políticas tendientes a reducir dichas emisiones (Ruiz, García y Sayer, 2007).

La conservación de la biodiversidad y la función protectora de suelos y cuencas hidrográficas son los servicios reconocidos desde hace más tiempo, existiendo figuras específicas de protección forestal asociados a espacios naturales protegidos para estos fines (Ruiz et al., 2007).

4.13. RESERVAS DE CARBONO COMO MITIGACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO

Los bosques juegan un papel crucial en la mitigación del cambio climático, debido a la capacidad que tienen para fijar y absorber el carbono atmosférico (FAO, 2006). El mecanismo por medio del cual los bosques fijan el CO₂ atmosférico para luego ser incorporado a los procesos metabólicos, es la fotosíntesis, ello da lugar a la síntesis de materias primas como la glucosa, para formar todas las estructuras necesarias para que el árbol pueda desarrollarse (Barrionuevo, 2007).

La temperatura juega un papel importante en la captura de carbono, ya que podría aumentar en algunas partes del globo terráqueo, provocando mayor tasa de mineralización de la materia orgánica por los microorganismos y tasa de respiración de las raíces; este efecto de la temperatura sobre la mineralización podría ser significativo en los países fríos, donde la temperatura es un factor limitante y donde puede ser esperado un incremento de las emisiones de CO₂ (Van Ginkel, Whitmore y Gorissen, 1999).

5. METODOLOGÍA

El presente estudio se enmarcó dentro del Proyecto “Estructura poblacional y servicios ambientales de *Quercus humboldtii* Bonpl. en Santa Isabel, Tolima, Colombia” (cód. 530114) de la Oficina de Investigaciones de la Universidad del Tolima.

5.1. ÁREA DE ESTUDIO

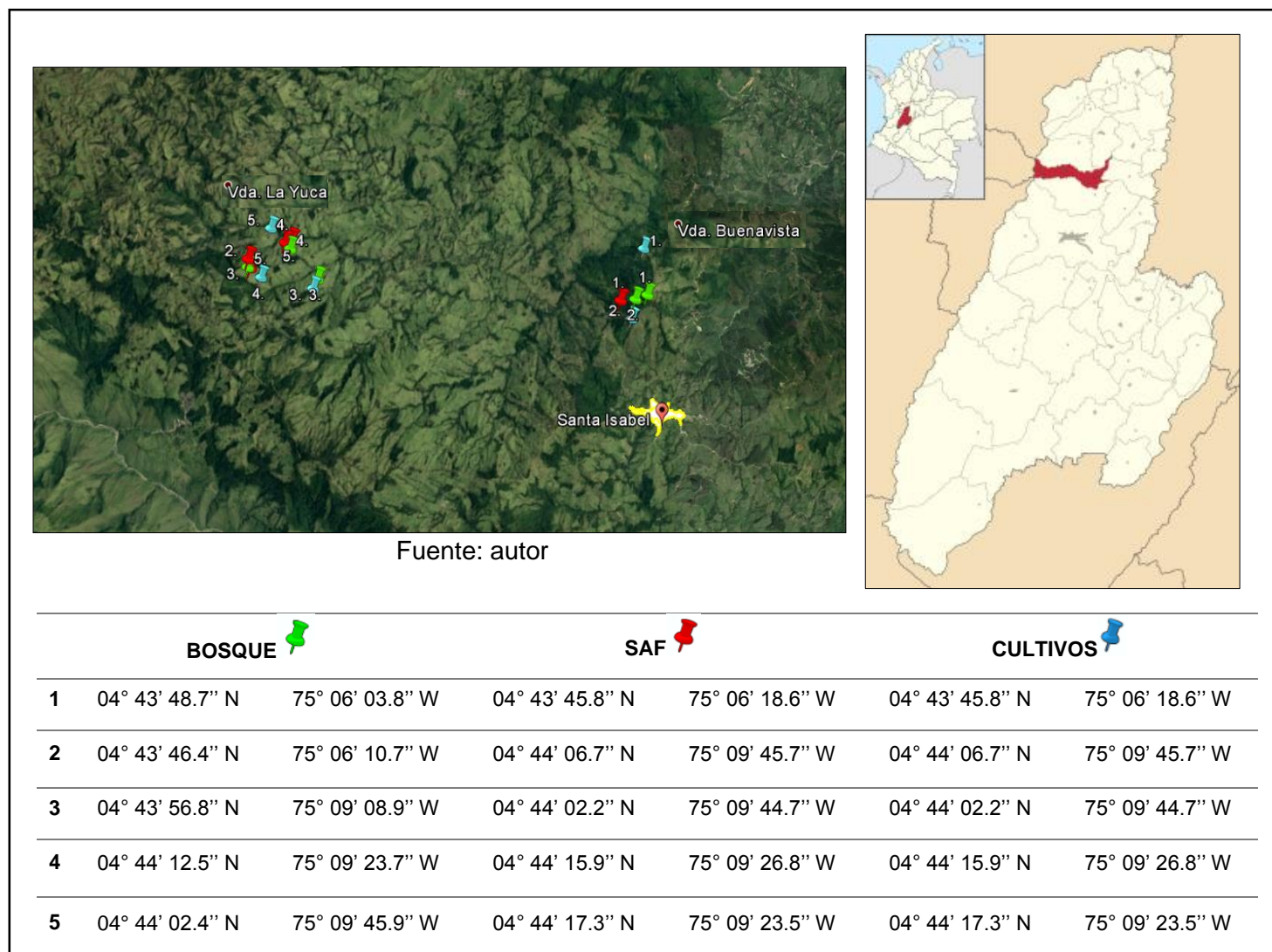
El estudio fue realizado en predios con coberturas de bosque nativo, cultivos y pasturas en asocio con árboles dispersos (SAF) del Municipio de Santa Isabel, localizado en el norte del departamento del Tolima. Su cabecera municipal está situada sobre los 3° 50´ N y los 90° 04´ O, a una altitud aproximada de 2900 m en un área clasificada como Bosque Húmedo Montano Bajo (bh-MB) (Holdridge, 1978), caracterizada por áreas dominadas en algunos sitios por roble (*Quercus humboldtii* Bonlp.) (Gulh y Leyva, 1997).

La zona de estudio presenta una temperatura promedio de 16°C, con precipitación anual de 1800 mm, dos periodos marcados de lluvia (diciembre-marzo y junio-agosto) y de sequía (abril-mayo y septiembre-octubre) (Consejo Municipal de Santa Isabel, 2012). El relieve es muy quebrado a escarpado y presenta suelos bien drenados, profundos y con alta susceptibilidad a la erosión (Plan Frutícola Nacional, 2006).

El área de influencia reposa sobre la Cuenca Hidrográfica Mayor del Río Totare; la cual se encuentra ubicada al Norte del Departamento del Tolima, sobre el flanco oriental de la Cordillera Central; nace en la Laguna el Encanto con una altitud de 3.963 msnm y desemboca en la margen izquierda aguas abajo del Río Magdalena, con elevación de 216 m.s.n.m. y una dirección general del cauce oeste este, cuya longitud aproximada es de 93,5 km y una pendiente media de 4.49 %, presenta una variación altitudinal que va desde los 213 hasta los 5.200 msnm, lo que genera dentro de su extensión una gran variedad de climas y paisajes (determinados según Clasificación Caldas Lang) que van

desde el cálido semiárido hasta el páramo alto súper húmedo y paisajes de lomerío hasta paisajes de montaña (CORTOLIMA, 2003)

Figura 1. Localización del municipio de Santa Isabel, Tolima y coordenadas geográficas de las coberturas (bosque y pastura)



5.2. CARACTERIZACIÓN DEL SUELO Y USOS DE LA TIERRA

Según el Proyecto de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica Mayor del Río Totare (CORTOLIMA, 2003), el área de estudio presenta una gran variación de paisajes representados en unidades fisiográficas y suelos poco evolucionados, bien drenados,

textura franco arcillosos ricos en materia orgánica y de profundidad efectiva superficial; el uso y la cobertura actual están determinados por coberturas de vegetación natural y pastizales en tres unidades: MKB (Consociación Alic Hapludands), MKD (Consociación Typic Troprothents) y MKG (Consociación Typic Hapludands) constituidos por depósitos espesos de cenizas volcánicas en relieves de tipo espinazo, filas y vigas, cañones y taludes, lomas y vallecitos.

A partir del Esquema de Ordenamiento Territorial para Santa Isabel (2003), los usos del suelo predominantes de la zona, son la cobertura forestal (Bosque) y SAF, principalmente basados en pasturas y cultivos. El municipio de Santa Isabel presenta como principal sistema de producción los cultivos de papa y ganado bovino doble propósito manejado de forma extensiva (Alcaldía Municipal de Santa Isabel, 2014). Los sistemas agrícolas y pecuarios interactúan ya que los cultivos de papa con el tiempo pasan a ser utilizados para la ganadería, pues se busca tierras nuevas de mejor productividad, situación que desencadena la llamada ampliación de la frontera agropecuaria (Corpoica, 2009).

De acuerdo al documento Estadísticas básicas de Santa Isabel (Gobernación del Tolima, 2000) Los sistemas productivos de la región en suelos de ladera están representados por cultivos de arveja, hortalizas, maíz, mora, tomate de árbol y ganadería de doble propósito de pequeños y medianos productores como parte del desarrollo socioeconómico y cultural del municipio (CORTOLIMA, 2003). Se consideró la capacidad del uso de suelo existente a partir de la cobertura presente en bosques jóvenes y secundarios, sistemas agroforestales dinámicos y productivos; categorizados de acuerdo a la extensión del terreno y grado de intervención.

En cuanto al uso del suelo en el municipio, el 10,39% está destinado a la actividad agrícola, el 58,36% son pastos, el 30,11% bosques y el 1,13% está dedicado a otros usos (Gobernación del Tolima, 2000).

Este estudio se realizó en los mismos predios seleccionados (5 cultivos, 5 pasturas y 5 cultivos) por el proyecto marco "Estructura poblacional y servicios ambientales de *Quercus humboldtii* Bonpl. en Santa Isabel, Tolima, Colombia" (Andrade et al., s.f.), los cuales fueron definidos de acuerdo a los usos del suelo reportados en la literatura y entrevistas con líderes locales quienes proporcionaron información actualizada y veraz del sector, luego se procedió a gestionar una comunicación directa con los dueños de los predios referenciados en la zona rural del municipio de Santa Isabel, Tolima.

El muestreo de raíces se realizó en las parcelas establecidas por el proyecto marco, las cuáles debían cumplir los siguientes criterios:

- a. Bosque: área mínima de 1000 m² y grado de intervención (bosques primarios y secundarios).
- b. SAF en asocio con árboles dispersos: con poca actividad ganadera.
- c. Cultivos agrícolas: debían estar aledaños a los bosques. Se seleccionaron cuatro tipos de cultivos (tomate de árbol, maíz, arveja verde y seca).

El área total de muestreo presenta una extensión de 59.534 m²; de los cuales 5.000 m² representan las parcelas rectangulares (20m x 50m) establecidas para el sistema bosque, 3.534 m² comprenden a parcelas circulares (r= 15m) para los SAF en asocio con árboles dispersos y los cultivos con 125000 m² (2,5 ha)

5.3. DISEÑO DE MUESTREO

Se trabajó con un diseño completamente al azar, con tres tratamientos de uso del suelo (bosques, sistemas agroforestales de pasturas con árboles y cultivos agrícolas) para raíces gruesas y totales, se identificaron cinco predios por cada sistemas de uso del suelo a evaluar (repeticiones).

En raíces finas se utilizó un diseño con arreglo en franjas (profundidades: 0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50 cm) con tres tratamientos, y cinco repeticiones.

En cada repetición (uso del suelo), se estableció una parcela temporal de muestreo (PTM) ubicada al azar dentro de cada predio para un total de 15 PTM, se inventariaron los fustales (árboles con dap > 10 cm) (Andrade et al., s.f.) para el sistema bosque y SAF en asocio con árboles dispersos (Tabla 1) con el objetivo de estimar la biomasa aérea.

Tabla 1. Especies inventariadas para los sistemas bosque y SAF en asocio con árboles dispersos

Sistema	Nombre común	Familia	Nombre científico
Bosque	Árbol del pan	Moraceae	<i>Ardisia foetida</i>
	Naranjuelo	Capparaceae	<i>Quadrella odoratissima</i>
	Guayabo	Myrtaceae	<i>Myrcianthes sp.</i>
	Laurel bobo	Laureaceae	<i>Nectandra lanceolata</i>
	Shakiro	Podocarpaceae	<i>Podocarpus sp.</i>
	Espadero	Laureaceae	<i>Ocotea sp.</i>
	Uvito	Erichaceae	<i>Cavendishia macrocephala</i>
	Chagualo	Clusiaceae	<i>Clusia mocoensis</i>
	Encenillo	Cunoniaceae	<i>Weinmania pubescens</i>
	Roble	Fagaceae	<i>Quercus humboldtii</i>
	Laurel	Laureaceae	<i>Nectandra sp.</i>
	Ligueron	Moraceae	<i>Ficus máxima</i>
	Cinco dedos	Araliaceae	<i>Schefflera sp.</i>
	Tabaquillo	Asteraceae	<i>Verbesina sp.</i>
	Mantequillo	Melastomataceae Miconia	<i>Miconia sp.</i>
	Oreja de mula	Rubiaceae	<i>Cinchona pubescens</i>
	Yema de huevo	Fabaceae Cesalpinoidea	<i>Senna bacilaris</i>
	Guamo	Fabaceae Mimosoideae	<i>Inga codonantha</i>
	Niquito	Melastomataceae	<i>Miconia sp.</i>
	Yarumo	Araliaceae	<i>Schefflera sp.</i>
Caucho	Laureaceae	<i>Ocotea sp.</i>	
Duromoco	Actinidiaceae	<i>Saurauia scabra</i>	

	Helecha	Cyatheaceae	<i>Cyathea sp.</i>
	Camargo	Asteraceae	<i>Smallanthus pyramidalis</i>
	Pavo	-----	-----
	Bobo	Laureaceae	<i>Nectandra lanceolata</i>
	Aliso	Betulaceae	<i>Alnus acuminata</i>
	Árbol loco	Asteraceae	<i>Montanoa</i>
SAF	Encenillo	Cunoniaceae	<i>Weinmania pubescens</i>
	Guayabo	Myrtaceae	<i>Myrcianthes sp.</i>
	Brullenia	Lamiaceae	<i>Brunellia</i>
	Gavilan	Verbenaceae	<i>Cytharexylum subflavescens</i>
	Arrayan	Myrtaceae	<i>Myrcianthes sp.</i>
	Candelo	Filantaceae	<i>Hieronyma macrocarpa</i>
	Gallinero	Myrtaceae	<i>Myrcianthes sp.</i>
	Chilco	-----	-----
	Guayacan	Fabaceae Mimosoide	<i>Poepigia procera</i>
	Sacaojo	Verbenaceae	<i>Lippia hirsuta</i>
	Chucho	Solanaceae	<i>Solanum sp.</i>
	Cedro	Meliaceae	<i>Cedrela montana</i>
	Tinto	Solanaceae	<i>Solanum sp.</i>
	Laurel	Laureaceae	<i>Nectandra sp.</i>

Fuente: Andrade et al., s.f.

5.4. ESTIMACIÓN DE BIOMASA EN RAÍCES FINAS Y ESTRUCTURALES

El muestreo de raíces finas y estructurales se realizó en las mismas PTM utilizadas para la estimación la biomasa aérea.

5.4.1. Raíces finas. La estimación de la biomasa en raíces finas (diámetro < 2 mm) se realizó en todos los sistemas de uso del suelo descritos anteriormente; para lo cual se extrajeron bloques de suelo de 10 x 10 x 10 cm (Figura 2A); como unidad de muestral, la cual debe contener una gran proporción de raíces uniformemente desarrolladas y bien distribuidas en torno al volumen de la muestra (Agroindustrias Lucano, 2006) en cinco profundidades (0-10; 10-20; 20-30; 30-40 y 40-50 cm) (Figura 2B) y posteriormente se pesaron las muestras recolectadas en campo (Figura 2C).

El procesamiento del suelo, con las raíces se efectuó en el Laboratorio de Fisiología Vegetal de la Universidad del Tolima, en donde los bloques colectados fueron lavados (Figura 2D) y tamizados (Figura 2E), para separar las raíces finas existentes del suelo, pasando las muestras por tamices de 2 mm de espesor. Seguidamente, las raíces se llevaron al horno a 70°C durante 72 horas para secarlas (Figura 2F) siguiendo la metodología utilizada por Andrade (1999). La biomasa de raíces finas se determinó como el peso seco de la muestra y los valores obtenidos se expresaron en toneladas por hectárea (t/ha).

Luego de obtener la biomasa de raíces finas por muestra de suelo (bloque ó monolitos), este valor se multiplicó por factor de corrección de “2” propuesto por Van Noordwijk et al. (2000) debido a pérdidas de raíces en el proceso de muestreo y procesamiento de la muestra en laboratorio.

Figura 2. Procedimiento para el muestreo de raíces en campo en ecosistemas Altoandinos de Santa Isabel, Tolima, Colombia



Fuente: Los autores

A. Toma de muestras en campo; B. Medición de la profundidad a la cual fue tomada la muestra; C. Muestra medida y herméticamente embolsada; D. Tamizado de las muestras; E. Lavado de muestras; F, Pesaje de muestras secas.

5.4.2. Raíces estructurales. La biomasa en raíces estructurales fue estimada considerando la biomasa arriba del suelo para el sitio a partir de los resultados reportados por el Proyecto “Estructura poblacional y servicios ambientales de *Quercus humboldtii* Bonpl. En Santa Isabel, Tolima, Colombia” (Andrade et al. S.f.), el cual realizó los cálculos de la biomasa arriba del suelo para *Quercus humboldtii*, Bonpl. (Roble) utilizando el modelo desarrollado por Pérez y Díaz (2010; Ec. 1) en la reserva biológica de Cachalú, Colombia y para bosques alto-andinos en el Páramo de Anaime, Tolima, Colombia (Lerma y Orjuela, 2014; Ec. 2). Los resultados por sistema se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Biomasa arriba del suelo para el sistema bosques y pasturas en paisajes alto-andinos de Santa Isabel, Tolima – Colombia

SISTEMA	N° de árboles en 1 ha	Ba (t/ha)
Bosque	255	286
Pastura	62	99

Fuente: Datos preliminares (Andrade et al., s.f.).

Tabla 3. Modelos alométricos para calcular biomasa de *Quercus humboldtii* y bosques alto-andinos en el Páramo de Anaime

ECUACIÓN	ESPECIES	MODELO	N	RANGO dap (cm)	R ²
1	<i>Quercus humboldtii</i>	$Bt = (-5,864 + 0,906 * dap)^2$	25	10-110	0,97
2	<i>Baccharis sp.</i>	$Ln (Bt) = -1,85 + 2,11 * Ln (dap)$	4	7,5-18,3	0,94
	<i>Miconia sp.</i>		10	8,95-53,2	
	<i>Weinmannia auriculata</i>		16	7,4-65,4	

Dónde:

Bt: Biomasa total arriba del suelo (kg/árbol)

dap: diámetro del tronco a la altura del pecho (cm)

La biomasa de las raíces estructurales se estimó mediante una ecuación general desarrollada por Cairns et al. (1997) y recomendada por el IPCC (2003), la cual puede ser aplicada a bosques tropicales (Ecuación 3).

$$Br = e^{(-1,0587 + 0,8836 * Ln(Ba))} \quad \text{Ec. 3.}$$

Dónde:

Br: Biomasa bajo suelo (t/ha); Ba: Biomasa arriba del suelo (t/ha)

El carbono almacenado en la biomasa total fue calculado utilizando el valor por defecto de 0,5 de fracción de carbono de acuerdo al IPCC (2003).

5.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

El análisis de los datos se realizó mediante un ANOVA y el test de Fisher LSD ($p < 0,05$) de acuerdo al diseño experimental empleado en el estudio de tres tratamientos (sistema de uso del suelo) para raíces gruesas y estructurales (Van Noordwijk et al., 2000; Ec. 4) y del diseño propuesto de arreglo en franjas con tres tratamientos (diferentes profundidades) por repetición para raíces finas (Van Noordwijk et al., 2000; Ec. 5). Todo el análisis estadístico se realizó empleando el software InfoStat (Di Rienzo, Casanoves, Balzarini, Tablada y Robledo, 2015).

Ecuación	Modelo
4	$y = \mu + \mathcal{T} + \mathcal{E}\mathcal{E}$
5	$y = \mu + \mathcal{T} + \mathcal{E}\mathcal{t} + \mathcal{P} + \mathcal{E}\mathcal{p} + \mathcal{E}\mathcal{E}$

Donde:

μ = Media; \mathcal{T} = Efecto del tratamiento; $\mathcal{E}\mathcal{t}$ = Error del tratamiento; \mathcal{P} = Profundidad; $\mathcal{E}\mathcal{p}$ = Error de profundidad; $\mathcal{E}\mathcal{E}$ = Error experimental

5.6. ESTIMACIÓN DEL IMPACTO DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO EN LAS RESERVAS DE CARBONO

El CO₂ liberado o el carbono capturado en la biomasa por efecto del cambio de uso del suelo, en la conversión de bosque natural a cultivos o pasturas (emisiones) y viceversa (almacenamiento) fueron calculados a partir de las diferencias de carbono total para cada sistema. Se asume que al existir un cambio de uso del suelo, se cambia de la misma forma el almacenamiento de carbono. La diferencia del almacenamiento de carbono se multiplicó por 3,67, que resulta de la relación entre el peso atómico del carbono y el peso molecular (IPCC, 2003, Ec. 6), para estimar el CO₂ equivalente.

$$CO_2e = 3,67 \times C \quad \text{Ec. 6.}$$

Donde:

CO₂e (t/ha) = Dióxido de carbono equivalente en hectáreas

C (t/ha) = Contenido de carbono en toneladas por hectárea

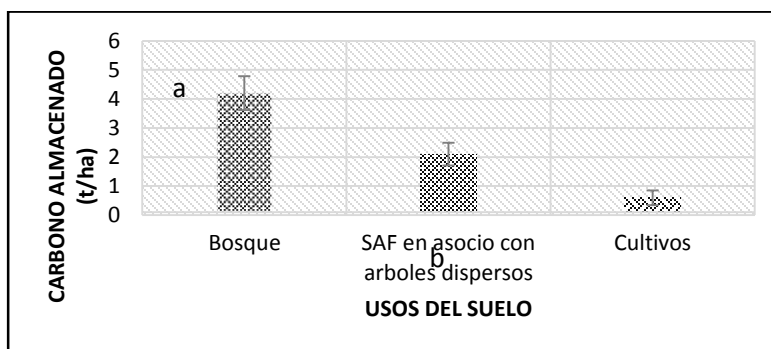
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. BIOMASA Y CARBONO BAJO SUELO

6.1.1. Biomasa De Raíces Finas.

En la figura 3 se puede observar la comparación del valor promedio de la acumulación de carbono de los tres sistemas objeto de estudio hasta los 50 cm de profundidad. Se detectaron diferencias significativas ($p < 0,05$) entre los diferentes usos del suelo con valores de biomasa bajo suelo $8,4 \pm 1,17$; $4,2 \pm 0,78$ y $1,2 \pm 0,51$ t/ha para bosques, pasturas y cultivos respectivamente. Los diferentes sistemas de uso del suelo evaluados influyen directamente en la capacidad de absorción de carbono debido a la cobertura y dinámica funcional de la región. Las raíces finas son las encargadas de la captura de los principales recursos en la planta, entre mayor sea su biomasa, mayor será la capacidad adquisitiva de la misma. Adicionalmente, la biomasa de raíces finas está directamente relacionada con las condiciones favorables para la fotosíntesis, estructura y composición florística del bosque, disponibilidad de nutrientes y su variación con micro sitios, con la presencia de oxígeno, la porosidad y permeabilidad del suelo (Barreto y León, 2005).

Figura 3. Carbono almacenado en biomasa de raíces finas (media \pm error estándar) a una profundidad de 0 a 50 cm respectivamente en paisajes alto-andinos de Santa Isabel, Tolima – Colombia



Las barras de error corresponden al error estándar de la media. Letras diferentes indican diferencias estadísticas ($p < 0,05$) entre sistemas.

Fuente: Los Autores

Estos resultados concuerdan con lo expuesto por Amézquita (2008), quien indica que los bosques capturan un 18% más que las pasturas; y a partir de ello se respalda la hipótesis de que el sistema bosques es el que más aporta a la disminución de los GEI y con ello a la mitigación del cambio climático FAO (2010). Se demuestra así que en sitios de mayor altitud, menor temperatura y alta pendiente del área es posible almacenar mayores niveles de carbono bajo el suelo, específicamente en raíces finas.

Debido a los intensos periodos de pastoreo en la zona y alta carga animal como características de las pasturas muestreadas, el alto nivel de defoliación ocasiona una reducción en el crecimiento (Engel, Nichols, Dodd y Brummer, 1998; Becker et al., 1997) y longitud de la raíz (Dawson, Thornton, Pratt y Paterson, 2004). Similares resultados han sido obtenidos por diversos estudios que demuestran que la dinámica de raíces se afecta bajo diferentes niveles de carga animal (Anderson, Starmer y Thonrn, 2007). Los resultados obtenidos se asemejan a los obtenidos por Amézquita (2008) en captura de carbono en sistemas de pasturas y silvopastoriles en cuatro ecosistemas de América Tropical vulnerables al cambio climático; los cuales arrojan una fijación de carbono total en raíces finas de 3,9 t/ha para pasturas en laderas andinas colombianas.

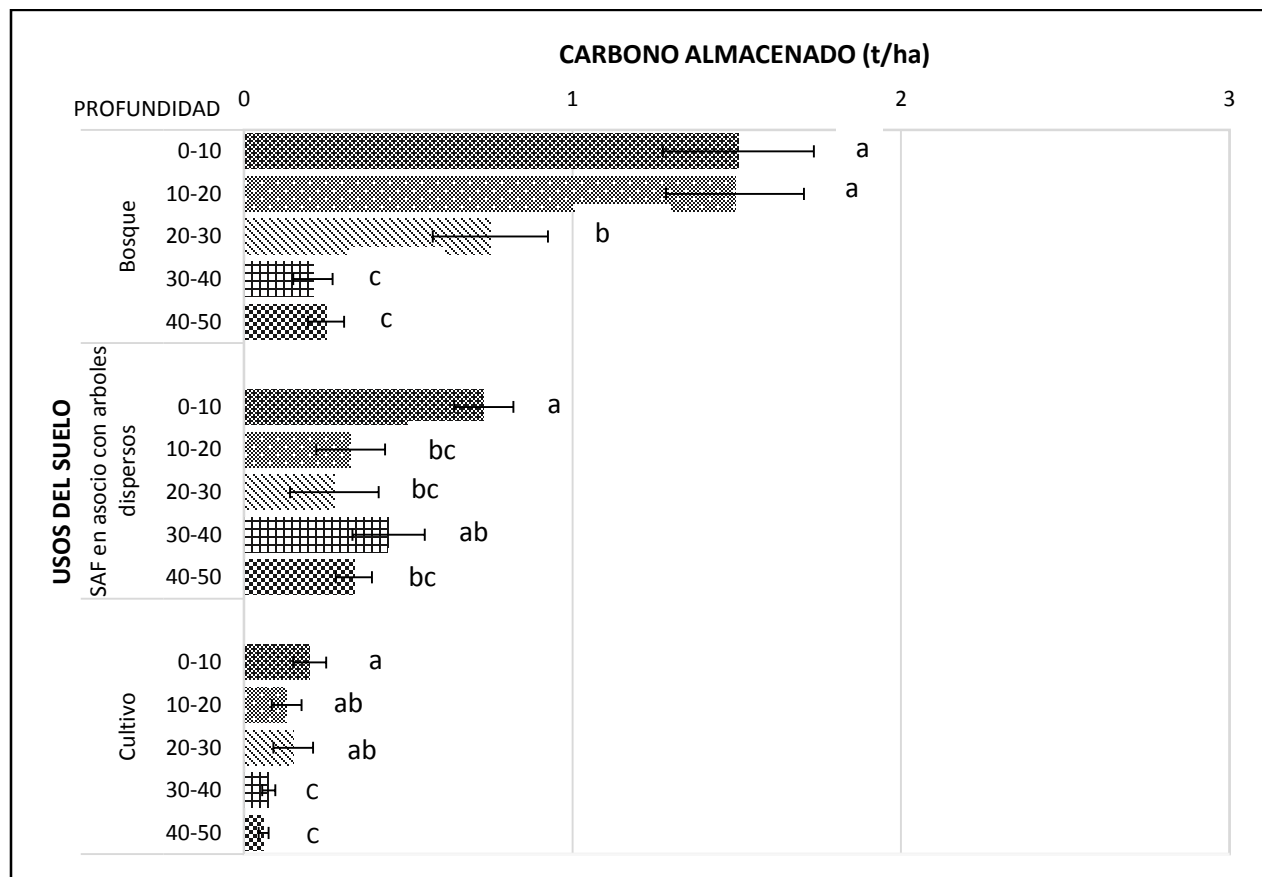
De acuerdo a Lal (1999); el sistema cultivo puede capturar carbono en condiciones templado-húmedas de 0,5 a 1,0 t/ha; 0,2 a 0,5 t/ha en los trópicos húmedos y 0,1 a 0,2 t/ha en las zonas semiáridas. Sin embargo el valor promedio obtenido en el estudio fue de 1,2 t/ha; el cual puede relacionarse con la arquitectura y capacidad del sistema radicular del maíz en profundizar exponencialmente hasta los 40 días después de la germinación (Johanne y Lynch, 2012). Similares resultados fueron encontrados en terrenos de ladera en la región de Mazateca, México donde evaluaron la acumulación de carbono en sistemas agrícolas anuales a partir de prácticas de laboreo convencional con fijaciones que alcanzaron los 1,3 y 1,4 t/ha, respectivamente (Etchevers, Acosta, Monreal, Quednow y Jiménez, 2001).

La supervivencia de los ecosistemas forestales bajo una gestión sostenible mejora las funciones medioambientales, socioculturales y económicas de una región; contribuyendo

a la mitigación del cambio climático, y a la rápida adaptación de las poblaciones que dependen de ésta dinámica funcional ante las nuevas condiciones climáticas originadas (FAO, 2006).

En la figura 4 se detalla la distribución de carbono en raíces finas a nivel del perfil del suelo para los tres diferentes sistemas de producción. El reservorio de carbono acumulado presenta diferencias estadísticas ($p < 0,05$) entre profundidades desde los primeros 10 cm con un impacto significativo en la acumulación de carbono.

Figura 4. Carbono almacenado (media \pm error estándar) a diferentes profundidades en bosques nativos, SAF en asocio con árboles dispersos y cultivos en ecosistemas altoandinos de Santa Isabel, Tolima – Colombia



Las barras de error corresponden al error estándar de la media. Letras diferentes indican diferencias estadísticas ($p < 0,05$) entre sistemas.

Fuente: Los Autores

En los bosques se encontraron diferencias estadísticas ($p < 0.05$) en el almacenamiento de carbono en las diferentes profundidades. El mayor contenido de carbono (71%) a lo largo del perfil del suelo se da entre 0 y 20 cm de profundidad, lo cual difiere un 29% de las restantes profundidades. Estos resultados concuerdan con los reportes de Doll et al. (2008), para la distribución de raíces finas en un bosque nativo de tipo forestal Roble-Hualo, ubicado en la precordillera andina de la región de Maule, Chile, ya que a medida que se aumenta la profundidad disminuye la cantidad de biomasa. Cabe resaltar que dicho estudio centra la toma de datos al estrato más superficial de suelo (hasta los 12 cm).

Para el caso de las pasturas, se denota que la diferencia estadística más significativa ($p < 0.05$) se presenta entre los 0 y 10 cm de profundidad y para el resto de las profundidades estudiadas no se encontraron diferencias significativas. Estos datos difieren completamente de los resultados obtenidos en el estudio de Céspedes, Fernández, Gobbi y Bernardis (2012), ya que en dicha investigación los valores del carbono almacenado en las raíces finas difieren estadísticamente en cada profundidad de muestreo (0-10, 10-20, 20-60 y 60-100 cm).

Una de las razones por las cuales en las pasturas se presenta una alta variabilidad en la distribución de raíces en el perfil hasta 50 cm podría explicarse con el estudio realizado por Fisher et al. (1994), quienes afirman que las especies con sistema radicular profundo constituyen una opción para incrementar en buena medida la acumulación de carbono, ya que lo pueden redistribuir en las capas más profundas de suelo. Los cultivos tienen las mismas características estadísticas que los SAF en cuanto a la captura de carbono presentando diferencias significativas ($p < 0,05$) para las profundidades de 10-20 y 20-30 cm con un almacenamiento de 0,28 t/ha.

La biomasa de raíces finas encontradas en el muestreo para el sistema bosque en los primeros 20 cm de profundidad fue en promedio 3 t/ha que corresponde al 71% del carbono total almacenado por el sistema. Este hallazgo coincide con los obtenidos por Baker, Conner, Lockaby, Stanturf y Burke (2001) quienes observaron que el 74% de

raíces finas de un bosque nativo de *Quercus* sp se hallaban en los 15 cm superficiales, al analizar los primeros 45 cm del perfil del suelo. Igualmente concuerda con estudios realizados por Raich (1983); Fujita & Yanagisawa (1999), los cuales demuestran que el comportamiento de las raíces finas con respecto a la profundidad se caracteriza principalmente por la alta concentración de biomasa en los primeros centímetros del suelo.

Cabe destacar que la biomasa de raíces finas tiende a disminuir conforme aumenta la profundidad (Figura 4). Esto es consistente con otros estudios realizados en bosque húmedo tropical (Calvo, Alvarado, Lawton y Arias, 2009); muy húmedo premontano (Jiménez y Arias, 2004) y tropical lluvioso (Moreno, Chacón y Lusk, 2004). Lo cual se debe posiblemente a cambios en la compactación del suelo; lo que representa variaciones en la disponibilidad de agua, movimiento de aire a través del sustrato (Jiménez y Arias, 2004) y menor resistencia a la penetración (Agüero y Alvarado, 1983).

En el estudio de raíces finas se denota que los principales factores que influyen la tendencia y distribución de las mismas son la profundidad del suelo, cobertura y composición florística del área, además del genotipo, edad de las plantas, prácticas silviculturales realizadas, densidad de individuos, cambios en la compactación del suelo, textura y contenido de humedad que afectan directamente la capacidad de absorción de humedad a lo largo del perfil (Zanabria y Cuellar, 2015).

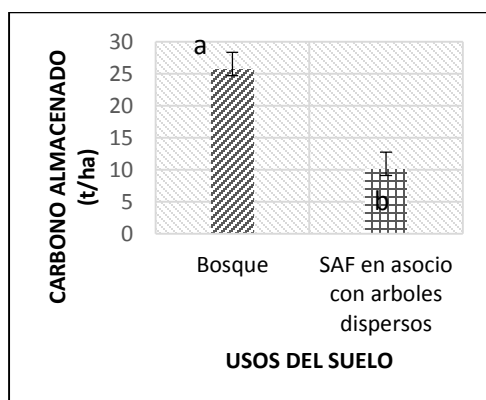
Las pasturas almacenaron un 50% del carbono de raíces para las primeras capas del suelo (0 a 20 cm) con un almacenamiento total de 1,05 t/ha (Figura 4). Estos resultados presentan cierta similitud a los reportados por Ramos (2003), donde se encontraron datos significativos en la presencia de raíces y por consiguiente carbono almacenado a la profundidad de suelo 0 a 20 cm (58,2% de carbono y un total de 1,9 t/ha). A medida que se incrementa la profundidad de muestreo, el contenido de materia orgánica disminuye respecto a los primeros 15 cm de profundidad, por efecto de la acumulación de la hojarasca, generando una actividad biológica superior y por tanto mayores posibilidades para la captura de carbono en el suelo (Oelbermann et al., 2004; Noda,

Lok, García y Fraga, 2013). Un factor que impacta directamente en la relación estructura – cobertura, es el material parental que poseen estos suelos. Según el IGAC (2004) estos se han desarrollado a partir de depósitos espesos de cenizas y arenas volcánica, la mezcla de materiales amorfos minerales y orgánicos tanto en el horizonte A como en los demás horizontes del perfil; refieren a buenas condiciones de porosidad y aireación dentro de la captación de carbono.

6.2. CARBONO ALMACENADO EN RAÍCES ESTRUCTURALES

En la figura 5 está representado el carbono radicular para raíces gruesas el cual fue significativamente mayor ($p < 0,05$) para el sistema bosques $26,0 \pm 2,8$ t/ha, respecto al sistema pasturas $10,0 \pm 0,9$ t/ha. En este análisis se toma en cuenta la biomasa aérea y de raíces gruesas obtenidas debido a que la biomasa aérea tiene correlación directamente positiva con la obtención de carbono en raíces gruesas de los diferentes usos del suelo evaluados. Estos resultados presentan cierta consistencia con los reportes de Orrego, Del Valle y Moreno (2003), quienes encontraron 33,5 t/ha de carbono en raíces gruesas en la región de Porce, Colombia.

Figura 5. Carbono almacenado en biomasa de raíces estructurales (media \pm error estándar) para el sistema bosques y SAF en asocio con árboles dispersos de paisajes alto-andinos de Santa Isabel, Tolima – Colombia



Las barras de error corresponden al error estándar de la media. Letras diferentes indican diferencias estadísticas ($p < 0,05$) entre sistemas.

Fuente: Los Autores

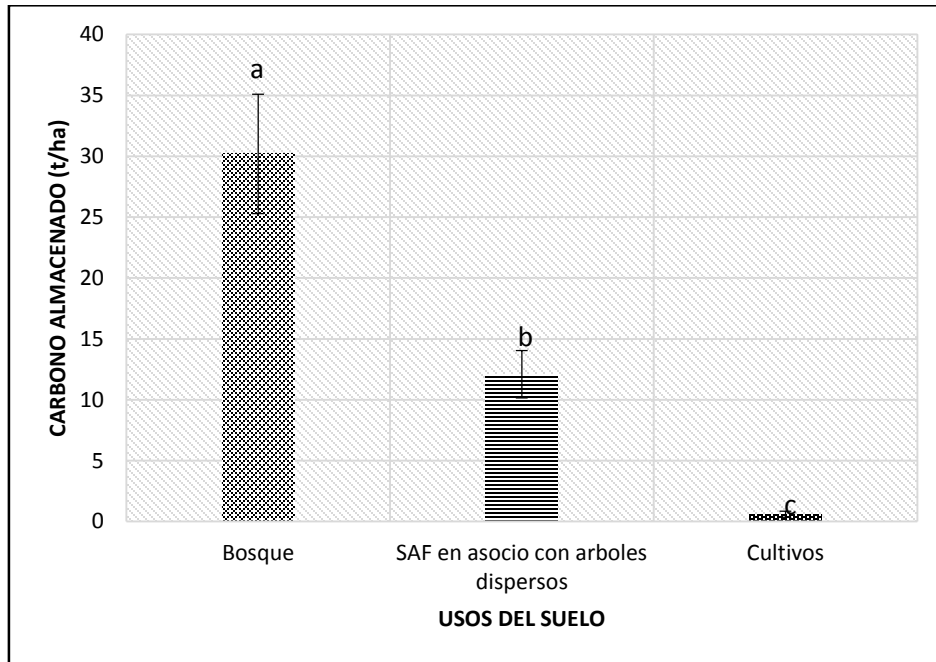
Las raíces gruesas (> 5 mm) que se encuentran a profundidades > 40 cm representan el 13% de la biomasa área total del árbol (MacDiken, 1997), lo que supone la importancia de este subcomponente en futuras evaluaciones. Por tanto, un mayor conocimiento de la densidad y distribución de las raíces de los árboles en la profundidad, puede constituir una herramienta importante en la elaboración de modelos para predecir la productividad subterránea de cada sitio, y así mismo mejores estimaciones de captura de carbono (Pavón, Moreno y Ramírez, 2012).

De acuerdo al estudio de biomasa radicular en un bosque húmedo montano bajo subtropical al sur-occidente de Guatemala, las raíces gruesas de 36 SAF con cacao (*Theobroma cacao*) almacenaron 13.69 t/ha de carbono (Dávila, 2011); y en asocio con nogal (*Cordia alliodora*) se encontraron valores promedio de 9.26 t/ha (Espín y Cerda, 2010). Lombo (2014) reportó valores de almacenamiento de carbono en raíces gruesas de 127,3 t/ha en bosque húmedo tropical y 21,6 t/ha en pasturas degradadas en el departamento del Caquetá, Colombia.

6.3. BIOMASA Y CARBONO RADICULAR TOTAL

El carbono radicular total resultó ser significativamente diferente ($p < 0,05$) entre sistemas: $30,2 \pm 6,9$; $12,1 \pm 1,9$ y $0,6 \pm 0,25$ t/ha en bosques, pasturas y cultivos, respectivamente (Figura 4).

Figura 6. Carbono almacenado (media \pm error estándar) en biomasa de sistemas radiculares en bosques nativos, SAF en asocio con árboles dispersos y cultivos en ecosistemas alto-andinos de Santa Isabel, Tolima – Colombia



Las barras de error corresponden al error estándar de la media. Letras diferentes indican diferencias estadísticas ($p < 0,05$) entre sistemas.

Fuente: Los Autores

Los resultados de este estudio resultan ser concordantes con lo reportado por Mena, Andrade y Navarro (2011), en el cual se comparan diferentes altitudes aproximadas (600, 800 y 1300 m) en el Corredor Biológico Volcánica Central- Talamanca (CBVCT), de sistemas de uso de la tierra para un bosque secundario y dos sistemas agroforestales, teniendo en éste que el bosque secundario contiene el 76% del carbono almacenado y los SAF un 24%.

Las raíces finas de árboles y cultivos tienen una tasa de descomposición rápida (de días a semanas); mientras que las raíces gruesas se descomponen más lentamente y de este modo contribuyen sustancialmente a las reservas de carbono bajo el suelo (Nair, P., Kumar y Nair, V, 2009).

Dhyani y Tripathi (2000) determinaron que el 70% de toda la biomasa radicular (entre raíces finas y gruesas) de un sistema de cultivo en callejones en el noreste de la India se encontraba en los primeros 20 cm. Lo anterior sugiere que el desarrollo de las raíces en la superficie ayuda a los árboles a establecerse en suelos pobres en nutrientes, favoreciendo el proceso de circulación y explotación de nutrientes limitados. Sin embargo, Nair (1993b) reporta valores de producción de biomasa radicular del 15% bajo la superficie de bosques tropicales, o de hasta 50% en SAF.

La producción de biomasa radicular es una importante fracción de la producción primaria neta de los árboles, pudiendo llegar a alcanzar un 60% de la productividad total arbórea (Helmisaari, Makkonen, Kellomäki, Valtonen y Mälkönen, 2002).

6.4. ESTIMACIÓN DEL IMPACTO DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO EN LAS RESERVAS DE CARBONO DE LA BIOMASA BAJO SUELO

El impacto del cambio de bosques a pastura podría ocasionar una reducción de 18,1 t C/ha y de bosques a cultivos un valor de 29,6 t C/ha; lo cual representa emisiones aproximadas de 66,4 y 108,6 t CO_{2e} a la atmósfera respectivamente. Sin embargo la recuperación de la estructura y funcionalidad del bosque, en búsqueda de que se establezcan nuevas coberturas del mismo podría causar el almacenamiento de carbono por parte de las raíces, dependiendo si se tienen pasturas o cultivos agrícolas, respectivamente (Tabla 4).

Tabla 4. Posibles cambios en el almacenamiento de carbono (t CO₂e/ha) para la biomasa en raíces por cambios potenciales de uso del suelo

		Sistema de uso del suelo futuro		
		Bosques (30,2 t C/ha)	SAF en asocio con árboles dispersos (12,1 t C/ha)	Cultivos (0,6 t C/ha)
Sistema de uso del suelo actual	Bosques (30,2 t C/ha)	-	-66,4	-108,6
	SAF en asocio con árboles dispersos (12,1 t C/ha)	66,4	-	-42,2
	Cultivos (0,6 t C/ha)	108,6	42,2	-

Los valores entre paréntesis corresponden al carbono total de raíces

Fuente: Los Autores

Según el grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2007), el 17,4% de las emisiones de GEI que se producen en el sector forestal proceden de fuentes antropogénicas; las cuales en su mayoría son provocadas por la deforestación como medio para la ampliación de la frontera agrícola. De acuerdo a esta emisión se referencia el estudio en las emisiones de CO₂e realizadas para el período 2005-2010 en el marco del proyecto “Capacidad Institucional, Técnica y Científica para Apoyar Proyectos de Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación -REDD- en Colombia”; el cual, a partir de los cambios de uso del suelo registraron que las emisiones en la conversión de la cobertura de bosque húmedo montano a tierras de cultivo y pastos permanentes reportan cifras de 4647 y 38,7 t CO₂e/ha, respectivamente (IDEAM, 2010).

Otros resultados sobre almacenamiento de CO₂ por cambio de uso de suelo son los reportados en el estado de Chiapas, México; que presentan una acumulación de 2,1 t CO₂e, producto de la conversión de tierras agrícolas y praderas a uso forestal (Bernardus, et al., 2011).

7. CONCLUSIONES

El sistema que mejores resultados presento en cuanto a la captura de carbono en raíces tanto finas como estructurales fue el sistema bosques, por tanto, se demuestra la importancia de su conservación y estudio para efectos de mitigación del cambio climático y preservación de los servicios ecosistémicos.

El carbono almacenado en las raíces totales fue mayor en la cobertura de bosque (70,4%) que en pastura (28,2%) y cultivos (1,4%).

La profundidad del suelo influye directamente en la cantidad de carbono retenido, ya que tienen la tendencia a disminuir a medida que se incrementa la profundidad, lo cual se debe a cambios en la estructura del suelo; el horizonte A comprende los primeros 10 cm donde se encuentra una acumulación aproximada de 34% de la biomasa radical total, un 42% desde los 10 a los 30 cm de profundidad, a partir de los cuales se extiende un horizonte B caracterizado por tener una estructura migajosa; es decir, bien drenado y poroso cuyas condiciones facilitan la propagación de raíces finas, dicho horizonte descansa sobre un C de color pardo oliva, para el cual retiene solo un 23% en los 30 a 50 cm del perfil del suelo.

La estimación de las emisiones neta de dióxido de carbono (CO₂) permite evaluar una aproximación en las cantidades de carbono liberado y capturado debido a los cambios de uso del suelo por efectos de la deforestación y regeneración que experimente el bosque natural. Teniendo en cuenta que la conversión de pasturas y cultivos agrícolas a bosques representa un almacenamiento de 18,1 y 29,6 t C/ha respectivamente; el cual implica un impacto positivo en la recuperación de áreas naturales y el restablecimiento en el suministro de servicios ambientales; sin embargo la alteración de bosques hacia otro tipo de uso de suelo conlleva una disminución progresiva en la capacidad del mismo en capturar carbono, representando una emisión aproximada de 66,4 y 108,6 t CO₂ a la atmósfera.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agroindustrias Lucano. (2006). Protocolo de Toma de Muestras a Campo y su Posterior Manejo en Laboratorio para la Obtención de Datos de Nodulación. Santa Cruz de la Sierra. Bolivia. 2.
- Agudelo, M. (2009). *Biomasa aérea y contenido de carbono en bosques de Quercus humboldtii y Colombobalanus excelsa: corredor de conservación de robles Guantiva - La rusa- Iguaque (Santander-Boyacá)*. (Tesis de Pregrado). Facultad de Ciencias Básicas: Universidad Autónoma de Occidente, Santiago de Cali.
- Agüero, J. & Alvarado, A. (1983). Compactación y compactibilidad de suelos agrícolas y ganaderos de Guanacaste, Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 7 (1), 27-33.
- Albrecht, A. & Kandji, S. (2003). Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 99 (1), 15-27.
- Alcaldía de Santa Isabel. (2014). Sitio oficial de Santa Isabel en Tolima, Colombia "Agroecoturismo...Fuente de prosperidad". Recuperado de: <http://www.santaisabel-tolima.gov.co/index.shtml#2>
- Alegre, J. C., Smyth, J., Weber, J. C. & Bandy, D. E. (1999). Long-term evaluation of a prototype multistrata system in the humid tropics of Perú. En J. C. Alegre, J. Smyth, J. C. Weber & D.E. Bandy, *Memories of International Symposium on Multi-strata Agroforestry Systems with Perennial Crops*. (pp. 90-93). Turrialba, Costa Rica
- .Amézquita, M. C. (2008). Captura de carbono en sistemas de pasturas y silvopastoriles en cuatro ecosistemas de América Tropical vulnerables al cambio climático. En M. C. Amézquita, *Foro Nacional Ambiental: Documento de políticas públicas 27* (pp.1-12). Bogotá, Colombia.
- Amézquita, M., Murgueitio, E., Ibrahim, M. & Ramírez, B. (2008). Carbon sequestration in tropical grassland ecosystems. Proyecto captura de Carbono. Cooperación Holandesa CO-010402, CIPAV – Universidad de la Amazonía – CATIE – CIAT – Universidad de Wageningen.

- Anderson, T., Starmer, W. & Thorne, M. (2007). Bimodal root diameter distributions in Serengeti grasses exhibit plasticity in response to defoliation and soil texture: implications for nitrogen uptake. *Functional Ecology*, 21 (1), 50–60.
- Andrade, J. (1999). *Dinámica productiva de sistemas silvopastoriles con Acacia mangium y Eucalyptus deglupta en el trópico húmedo*. (Tesis de Maestría) Programa de educación para el desarrollo y la conservación. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Turrialba, Costa Rica.
- Andrade, H., & Ibrahim, M. (2003). ¿Cómo monitorear el secuestro de carbono en los sistemas silvopastoriles? *Agroforestería en las Américas* 10 (39-40), 109-116.
- Andrade, J., Brook, R. & Ibrahim, M. (2008). Growth, production and carbon sequestration of silvopastoral systems with native timber species in the dry lowlands of Costa Rica. *Plant and Soil*, 308 (11-22), 11-22.
- Andrade, J., Espinosa E. & Moreno, H. (2014). Impact of grazing on soil organic storage carbon in high lands of Anaime. Tolima, Colombia. *Zootecnia tropical*, 32 (1), 7-21.
- Andrade, H., Segura, M., Canal, D., Sierra, E & Llano, J. (s.f). Estructura poblacional y servicios ambientales de *Quercus humboldtii* Bonpl. en Santa Isabel, Tolima, Colombia cód. 530114. Ibagué, Tolima. *Facultad de Ingeniería Forestal*.
- Armenteras, D. & Morales, M. (2003). *La Representatividad Ecosistémica como uno de los Elementos para la Evaluación y Diseño de Áreas Protegidas* (Documento interno Instituto Alexander von Humboldt). Bogotá, Colombia.
- Arriaga, L. & Gómez, L. (2004). Posibles efectos del Cambio Climático en algunos componentes de la biodiversidad de México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. En J. Martínez, A. Fernández y P. Osnaya (Comps.), *Cambio Climático: Una Visión desde México* (254-265). Coyoacán, México: Periférico Sur 5000.
- Avella, A., López, R. & Nieto, J. (2014). *Evaluación de la dinámica del carbono en los bosques de roble (Fagáceas) de la Cordillera Oriental de Colombia: Análisis a partir de patrones florísticos, estructurales y funcionales en un gradiente ecológico* (Convenio de investigación N° 004). Colombia.

- Baker, T., Conner, W., Lockaby, B., Stanturf, J. & Burke, M. (2001). Fine root productivity and dynamics on a forested floodplain in south Carolina. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 65 (1), 545-556.
- Barrantes, G. (2001). *Capitalización y sostenibilidad de los activos naturales y sus servicios ambientales*. Heredia, Costa Rica.
- Barreto, L. & León, J. (2005). Masa total y contenido de nutrientes en raíces finas de ecosistemas forestales (*Pinus patula Schlttdl y Cham*, *Cupressus lusitanica Mill* y *Quercus humboldtii* Bonpl.) de Piedras Blancas, Antioquia, Colombia. *Facultad Nacional de Agronomía*, 58 (2), 2907-2929.
- Barrionuevo, S. (2007). Los Bosques como sumideros de carbono Alternativas para mitigar el Efecto Invernadero. Facultad de ciencias forestales. Universidad nacional de Santiago del Estero. Argentina. *Quebracho*, (15), 54-58.
- Becker, G., Busso, C., Montani, T., Burgos, M., Flemmer, A. & Toribio, M. (1997). Effects of defoliating *Stipa tenuis* and *Piptochaetium napostaense* at different phenological stages: root growth. *Journal of Arid Environments*, 35 (1), 269–283.
- Begon, M., Harper, J. & Townsend, C. (1996). *Ecology: individuals, populations and communities*. Oxford, UK. Blackwell Scientific Publications. Recuperado de: <http://www.bio-nica.info/biblioteca/Begon2006Ecology.pdf>
- Benavides, H. & León, G. (2007). Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático. IDEAM: Subdirección de Meteorología. Bogotá. Recuperado de: http://documentacion.ideam.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=9059&shelfbrowse_itemnumber=9585
- Bernardus, H., Maldonado, V., Rojas, F., Olgúin, M., De la Cruz, V., Castillo, M., Jimenez, G., Mirinidou, E., Flores, A., Ochoa, S. & Paz, F. (2011). Inventario estatal de gases de efecto invernadero. Programa de acción ante el cambio climático. México: Layun.
- Böhm, W. (1979). *Methods of studying root systems*. Berlin: Springer-Verlang.
- Brown, S. (1996). Mitigation potential of carbon dioxide emission by management of forest in Asia. *Ambio*, 25 (4), 273-278.

- Brown, S., Sathaye, J., Cannell, M. & Kauppi, P. (1996). Mitigation of carbon emissions to the atmosphere by forest management. *The Commonwealth Forestry Review*, 75 (1), 80-91.
- Brown, S. (1997). *Estimating biomass and biomass change of tropical forest: A primer*. Recuperado de: <http://www.fao.org/docrep/w4095e/w4095e00.htm>
- Brown, S. (1997). Los bosques y el cambio climático: el papel de los terrenos forestales como sumideros de carbono. En S. Brown Congreso Forestal Mundial (107-121). Ankara, Turquía.
- Burke, M. & Raynal, D. (1994). Fine root growth phenology, production, and turnover in a northern hardwood forest ecosystem. *Plant and Soil*, 162 (1), 135-146.
- Calvo, J. C., Lawton, R. O. & Arias, O. D. (2009). Distribución de biomasa de raíces finas en bosques y pastos en una gradiente ambiental en Costa Rica. En J. Calvo, R. Lawton & O. Arias, *XVIII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo de la Sociedad Latinoamericana de la Ciencia del Suelo/Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo* (3-67). San José, Costa Rica.
- Cairns, M., Brown, S., Helmer, E. & Baumgardner, G. (1997). Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia*, 111 (1), 1-11.
- Cárdenas, D. & Salinas, N. (2007). *Libro Rojo de plantas de Colombia. Especies Maderables Amenazadas I parte*. Bogotá, Colombia: Nestor García.
- Carmona, J., Bolívar, D. & Giraldo, L. (2005). El gas metano en la producción ganadera y alternativas para medir sus emisiones y aminorar su impacto a nivel ambiental y productivo. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 18 (1), 49-63.
- Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno del Niño (CIIFEN). (2012). Ciclos Biogeoquímicos. Recuperado de: http://www.ciifen.org/index.php?option=com_content&view=article&id=580&catid=98&contenido=1&Itemid=131&lang=Des
- Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno el Niño (CIIFEN). (2015). Efecto Invernadero. Recuperado de: http://www.ciifen.org/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=99&Itemid=132&lang=Des.

- Céspedes, F., Fernández, J., Gobbi, J. & Bernardis, A. (2012). Reservorio de carbono en suelo y raíces de un pastizal y una pradera bajo pastoreo. *Fitotecnia mexicana*, 35 (1), 9-19.
- Ciesla, W. (1996). Cambio climático, bosques y ordenación forestal. Una visión de conjunto. Estudio FAO Montes N° 126. Roma, Italia.
- Claus, A. & George, E. (2011). Effect of stand age on fine-root biomass and biomass distribution in three European forest chronosequences. *Canadian Journal of Forest Research*, 35 (7), 1617-1625.
- Colombia, Consejo Municipal de Santa Isabel. (2012). *ACUERDO MUNICIPAL No.006 de 2012*. Santa Isabel, Tolima. Legis
- Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). (1994). Convención de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Recuperado de: http://unfccc.int/essential_background/convention/items/2627.php
- Coordinación de energías renovables. (2008). Energías Renovables 2008 – Energía Biomasa. Secretaría de energía. Recuperado de: https://www.energia.gov.ar/contenidos/archivos/Reorganizacion/contenidos_didacticos/publicaciones/libro_energia_biomasa.pdf
- Corporación Autónoma de Antioquia (CORANTIOQUIA). (1997). *Plan maestro de acueducto y alcantarillado urbano del municipio de Entrerrios* (Informe de Diagnóstico). Antioquia: SaneAmbiente Ltda.
- Corporación Autónoma Regional del Tolima (CORTOLIMA). (2003). Proyecto plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica mayor del río Totare (Convenio Cortolima – Corpoica – Sena y Universidad del Tolima). Ibagué, Tolima: Cortolima
- Coutts, M., Nielsen, C. & Nicoll, B. (1999). The development of symmetry, rigidity and anchorage in the structural root system of conifers. *Plant and soil*, 217 (1), 1-15.
- Cuesta, F., Bustamante, M., Becerra, M., Postigo, J. & Peralto, J. (eds). (2012). *Panorama Andino sobre Cambio Climático: Vulnerabilidad y Adaptación en los Andes Tropicales*. Lima, Perú: Activa Diseño.
- Dauber, E., Teràn, J. & Guzman, R. (2006). Estimaciones de biomasa y carbono en bosques naturales de Bolivia. *Revista Forestal Iberoamericana*, 1 (1), 1-10.

- Dawson, L., Thornton, B., Pratt, S. & Paterson, E. (2004). Morphological and topological responses of roots to defoliation and nitrogen supply in *Lolium perenne* and *Festuca ovina*. *New Phytologist Trust*, 161 (3), 811–818.
- Dávila, H. (2011). *Estimación de la cantidad de carbono almacenado en los sistemas agroforestales de cacao (Theobroma cacao L.), en los departamentos de Suchitepquez Y Retalhuleu del sur-occidente de Guatemala*. (Tesis de Pregrado) Facultad de Agronomía: Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
- Del Olmo, V & Martin, J. (2004). Los bosques como sumideros de carbono: una necesidad para cumplir con el Protocolo de Kioto. *Montes*, (77), 44-49.
- Delgado, L. & Pedraza, R. (2002). La madera muerta de los ecosistemas forestales. *Foresta Veracruzana*, 4 (2), 59-66.
- Devia, C. & Arenas, H. (2000). Evaluación del estatus ecosistémico y de manejo de los bosques de fagáceas (*Quercus humboldtii* y *Trigonobalanus excelsa*) en el norte de la Cordillera Oriental (Cundinamarca, Santander y Boyacá). En: Cárdenas, F. (ed.). *Desarrollo Sostenible en los Andes de Colombia (Provincias de Norte, Gutiérrez y Valderrama) Boyacá, Colombia*. IDEAD - Universidad Javeriana con el apoyo de la Unión. Bogotá.
- Dhyani, S. & Tripathi, R. (2000). Biomass and production of fine and coarse roots of trees under agrisilvicultural practices in north-east India. *Agroforestry Systems*, 50 (1), 107-121.
- Díaz, M. (2010). Uso de especies forestales asociadas a bosques de roble (*Quercus Humboldtii* Bonlp), con fines energéticos, en tres veredas del municipio de Encino-Santander. *Colombia Forestal*, 13 (2), 237-244.
- Di Rienzo, J., Casanoves, F., Balzarini, M., Tablada, M. & Robledo, C. (2012). *Infostat 2012*, Grupo Infostat, FCA. Argentina: Universidad Nacional de Córdoba. Recuperado de: https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=en&user=yumGXjoAAAAJ&citation_for_view=yumGXjoAAAAJ:UHK10RUVsp4C
- Dixon, K., Schroeder, P. & Winjum, J. (1991). Assessment of promising forest management practices and technologies for enhancing the conservation and

- sequestration of atmospheric carbon, and their costs at the site level. Corvallis, Oregon, USA.
- Dixon, R. (1995). Agroforestry systems: sources or sinks of greenhouse gases. *Agroforestry Systems*, 31 (2), 99–116.
- Doll, U., Vallejos, O., Bilbao, N. & Jara, C. (2008). Estimación preliminar de la retención de carbono en raíces finas y mantillo en un renoval de *Nothofagus glauca* de la precordillera andina de la región del Maule, Chile. *Bosque*, 29 (1), 91-96.
- Eamus, D., McGuinness, K., & Burrows, W. (2000). Review of allometric relationships for estimating woody biomass for Queensland, the northern territory and Western Australia. *National Carbon Accounting System*, 5 (1), 1-56.
- Engel, R., Nichols, J., Dodd, J. & Brummer, J. (1998). Root and shoot response of sand bluestem to defoliation. *Journal of Range Management*, 51 (1), 42–46.
- Etchevers, J., Acosta, M., Monreal, K., & Jiménez, L. (2001). Los stocks de carbono en diferentes compartimentos de la parte aérea y subterránea en sistemas forestales y agrícolas de ladera en México. *Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de carbono en ecosistemas forestales*. (pp. 11-14). Valdivia, Chile.
- Espin, T. & Cerda, R. (2010). *Estimación de carbono en sistemas agroforestales de cacao (Theobroma cacao) y laurel (Cordia alliodora) en diferentes condiciones de paisaje en la reserva indígena de Talamanca, Costa Rica*. (Trabajo de Pregrado) Facultad de Ciencias Agrícolas: Universidad de Nariño, San Juan de Pasto, Nariño.
- Fisher, M., Rao, I., Ayarza, M., Lascano, C., Sanz, J., Thomas, R. & Vera, R. (1994). Carbon storage by introduced deep-rooted grasses in the South American savannas. *Nature Publishing Group*, 371 (1), 236-238.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (1999). Situación de los bosques del mundo. Recuperado de: <http://www.fao.org/docrep/W9950S/w9950s02.ht>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2000). Directrices para la evaluación en los países tropicales y subtropicales. Recuperado de: <http://www.fao.org/docrep/007/ae218s/AE218S06.htm>

- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2001). Situación de los bosques del mundo. Problemas clave del sector forestal (Parte II): El cambio climático y los bosques. Recuperado de: <http://www.fao.org/3/a-y0900s/y0900s06.htm>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2006). Los bosques y el cambio climático. La gestión forestal es fundamental para afrontar el cambio climático. FAO sala de prensa. Recuperado de: <http://www.fao.org/Newsroom/es/focus/2006/1000247/index.html>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2010). Los bosques y el cambio climático. La gestión forestal es fundamental para afrontar el cambio climático. Recuperado de: <http://www.fao.org/Newsroom/es/focus/2006/1000247/index.html>.
- Fonseca, W., Alice, F. & Rey, J. (2009). Modelos para estimar la biomasa de especies nativas de plantaciones y bosques secundarios en la zona caribe de Costa Rica. *Scielo*, 30 (1), 36-47.
- Flores, E. (1999). La planta, estructura y función. Cartago: LUR.
- Fujita, N., & Yanagisawa, N. (1999). Different distribution patterns of woody species on a slope in relation to vertical root distribution and dynamics of soil moisture profiles. *Ecological Research*, 14(1), 165-177.
- Gayoso, J. & Guerra, J. (2005). Contenido de carbono en la biomasa aérea de bosques nativos en Chile. *Scielo*, 26 (2), 33-38. Recuperado de: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-92002005000200005
- Gobernación del Tolima. (2000). Estadísticas básicas Santa Isabel. Recuperado de: <http://cdim.esap.edu.co/BancoMedios/Documentos%20PDF/santaisabeltolimaeb20002010.pdf>
- González, M. & Parrado, R. (2010). Diferencias en la producción de frutos del roble *Quercus humboldtii* Bonpl. en dos bosques andinos de la cordillera oriental Colombiana. *Colombia Forestal*, 13 (1), 141-162.
- Guimarães, J., Leandro, R., Pulrolnik, K., Vilela, L. & Pereira, L. (2010). Integração lavoura-pecuária-floresta: Uma alternativa para produção animal sustentável. Em: J. Guimarães, R. Leandro, K. Pulrolnik, L. Vilela. & L. Pereira. *Simpósio de*

- Integração Lavoura-pecuária-Floresta: Alternativa para produção sustentável nos trópicos* (p. 49). Montes Claros, Brasil.
- Gulh, A. & Leyva, P. (1997). Zonificación Ecológica de Colombia usando las Zonas de Vida de Holdridge. IDEAM. Bogotá, Colombia.
- Helmisaari, H., Makkonen, K., Kellomäki, S., Valtonen, E & Mälkönen, E. (2002). Below and above-ground biomass, production and nitroge use in Scots pine stands in eastern Finland. *Forest Ecology and Management*, 165 (1), 317-326.
- Higuera, D. (2008). *Los robles del Neotrópico como unidades proveedoras de servicios. El caso de estudio de la reserva Macanal-Colombia*. (Tesis de Maestría). Universidad Autónoma de Madrid, España.
- Hooker, J., Hendrick, R. & Atkinson, D. (2000). The measurement and analysis of fine root longevity (Chapter 9). In Smit, A., Bengough, A., Engels, C., Van Noordwijk, M., Pellerin, S. & Van de Geijn, S (eds). *Root methods: a handbook*. Springer. pp. 273-304.
- Hofstede, R. (2002). Los páramos andinos; su diversidad, sus habitantes, sus problemas y sus perspectivas. Un breve diagnostico regional del estado de conservación de los páramos. En C. A. Jaramillo, C. Castaño, F. Arjona, J. V. Rodríguez & C. L. Duran (eds). *Congreso Mundial de Paramos, Memorias*, Bogotá, Colombia.
- Huges, R., Kauffman, J. & Jaramillo, V. (1999). Biomass, carbon and nutrients dynamics of forests in a humid tropical region of Mexico. *Ecology*, 80 (6) ,1892-1907.
- Ibrahim, M., Gobbi, J., Casasola, F., Chacho, M., Ríos, N., Tobar, D., Villanueva, C. & Sepúlveda, C. (2007). Enfoques alternativos de pagos por servicios ambientales: Experiencia del proyecto Silvopastoril. Costa Rica.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2004). Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras Departamento de Tolima. Bogotá, Colombia
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM). (2010). *Estimación de las emisiones de dióxido de carbono generadas por deforestación durante el período 2005-2010*. Recuperado de: <http://www.ideam.gov.co/documents/13257/13548/Emisiones.pdf/a86b9bd1-0050-4bb9-a54f-c3ad6b3cda26>

- Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC. (2003). *Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry*. Recuperado de: http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpplulucf/gpplulucf_files/GPG_LULUCF_FULL.pdf
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2007. *Climate change: the physical science basis*. Cambridge University Press. Recuperado de: https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4_wg1_full_report.pdf
- Imbert, J., Blanco, J. & Castillo, F. (2004). *Gestión forestal y ciclos de nutrientes en el marco del cambio global*. Recuperado de: http://www.adaptecca.es/sites/default/files/documentos/cap17_-_gestion_forestal_y_ciclos_de_nutrientes_en_el_marco_del_cambio_global.pdf
- Jackson, R., Mooney, H. & Schulze, E. (1997). A global budget for fine root biomass, surface area, and nutrient contents. *PNAS*, 94 (14), 7362-7366.
- Jiménez, C. & Arias, D. (2004). Distribución de la biomasa y densidad de raíces finas en una gradiente sucesional de bosques en la Zona Norte de Costa Rica. *Kurú*, 1 (2), 9-12.
- Johanne, P. & Lynch, P. (2012). Complementarity in root architecture for nutrient uptake in ancient maize/bean and maize/bean/squash polycultures. *Ann Bot*, 110 (2), 521-534.
- Kattan, G. (1997). Transformación de paisajes y fragmentación de hábitat. Informe Nacional Sobre El Estado De La Biodiversidad. Causas De Pérdida De La Biodiversidad. Instituto Von Humboldt. Santafé de Bogotá.
- Klinge, H. (1973). Roots mass estimation in lowland tropical rain forest of Central Amazonia. Coarse root mass of trees and palms in different height classes. *Ann. Acad. Brasil. Cien*, 45, (3-4), 595-609.
- Lal, R. (1999). Global carbon pools, fluxes and the impact of agricultural intensification and judicious land use. In: Prevention of land degradation, enhancement of carbon sequestration and conservation of biodiversity through land use change and sustainable land management with a focus on Latin America and the Caribbean. World Soil Resources Report 86. Rome, Italia.

- Lerma, M. & Orjuela, E. (2014). *Modelos alométricos para la estimación de la biomasa aérea total en el páramo e Anaimé, departamento del Tolima, Colombia*. (Tesis de pregrado) Facultad de Ingeniería Forestal: Universidad del Tolima, Ibagué, Tolima.
- Lombo, F. (2014). Estimación del carbono almacenado en bosque, rastrojo y pasturas en el Departamento del Caquetá, Colombia. Proyecto NZDZ.
- MacDicken, K. G. (1997). *A guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects*. Recuperado de: http://planvivo.org/docs/2015/05/Winrock_guide_to_monitoring_C_storage.pdf
- Marino, R. & Custodio, M. (2013). Almacenamiento de carbono en pastos naturales altodinos. *Scientia Agropecuaria*, 4 (4) ,314.
- Megias, M., Molist, P. & Pombal, M. A. (2015). Atlas de Histología Vegetal y Animal: Órganos vegetales, Raíz. Recuperado de: <https://mmegias.webs.uvigo.es/descargas/o-v-raiz.pdf>
- Márquez, G. (2001). *De la abundancia a la escasez: La transformación de ecosistemas en Colombia*. Recuperado de: <http://www.bdigital.unal.edu.co/46808/48/9587010760.capitulo7.pdf>
- Masera, O. & Sheinbaum, C. (2004). Mitigación de emisiones de carbono y prioridades de desarrollo nacional. Cambio climático: Una visión desde México. En: J, Martínez, A, Fernández & P. Osnaya (eds). Cambio Climático: Una visión desde México, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Mena, V., Andrade, H. & Navarro, C. (2011). Biomasa y carbono almacenado en sistemas agroforestales con café y en bosques secundarios en un gradiente altitudinal de Costa Rica. *Agroforestería Neotropical*, 1 (1) ,2-20.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2006) *Resolución N° 096 de 2006*. República de Colombia.
- Ministerio del Medio Ambiente & Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2010). *Segunda Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático*.

- Mojica, C. (2013). *Caracterización, almacenamiento de carbono y emisiones evitadas en bosques nativos en áreas de influencia del páramo de Anaime*. (Tesis de pregrado). Facultad de Ingeniería Forestal: Universidad del Tolima, Ibagué, Tolima.
- Montagnini, F. & Nair, P. (2004). Carbon sequestration: an underexploited environmental benefit of agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, 61–62 (1–3), 281–295.
- Moreno, M., Chacon, M., Lusk, C. (2004). Vertical distribution of fine root biomass of emergent *Nothofagus dombeyi* and its canopy associates in a Chilean temperate rainforest. *Forest Ecology and Management*, 199 (2), 177-181.
- Nair, P. K. (1993). *An introduction of Agroforestry*. Dordrecht, NL, Kluwer Academic Publishers. Recuperado de: https://www.worldagroforestry.org/Units/Library/Books/PDFs/32_An_introduction_to_agroforestry.pdf?n=161%22
- Nair, P. K. (1993). *Agroforestry systems in the tropics*. 2ed. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, the Netherlands. Aberdeen: Springer.
- Nair, P. K. (2004). Agroforestry: Trees in support of sustainable agriculture. Encyclopedia of Soils in the Environment. In: Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences Elsevier: Springer.
- Nieto, V & Rodríguez, J. (2006). Species descriptions, Part II. *Quercus humboldtii* Bonpl. Corporación Nacional de Investigación Forestal Recuperado de: <file:///E:/descargas/Quercus%20humboldtii%20Bonpl..pdf>
- Noda, A., Lok, S., García, M. & Fraga, S. (2013). Almacenamiento de carbono en el suelo de tres sistemas ganaderos tropicales en explotación con ganado vacuno. *Ciencia Agrícola*, 47 (1), 75-82.
- Corporación Agropecuaria Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica). (2009). *Estudio de estado actual (EEA) y Plan de manejo (PM) de Los páramos del Departamento del Tolima*.
- Oelbermann, M., Voroney, R. & Gordon, A. (2004). Carbon sequestration in tropical and temperate agroforestry systems: a review with examples from Costa Rica and Southern Canada. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 104 (3) ,359–377.
- Ordoñez, J. A. (1999). *Captura de carbono en un bosque templado: el caso de San Juan Nuevo, Michoacán. México*. Recuperado de: <file:///E:/descargas/NSJP1999.pdf>

- Orjuela, J., Ramírez, B. & Andrade, H. (2010). Potencial de almacenamiento de carbono en áreas de regeneración natural de paisajes ganaderos de la Amazonia Colombiana. *Facultad de Ciencias Agropecuarias*, 2 (10), 61.
- Ortiz, A. & Riascos, L. (2006). *Almacenamiento y fijación de carbono del sistema agroforestal cacao Theobroma cacao L y laurel Cordia alliodora (Ruiz y Pavón) Oken en la reserva indígena de Talamanca, Costa Rica*. (Tesis de Pregrado). Facultad de Ciencias Agrícolas: Universidad de Nariño, San Juan de Pasto, Nariño.
- Orwa, C., Mutua, A., Kindt, R., Jamnadass, R. & Anthony, S. (2009). *Agroforestry Database: a tree reference and selection guide version*. Recuperado de: <http://www.worldagroforestry.org/sites/treedbs/treedatabases.asp>.
- Orrego, S., Del Valle, J., Moreno, F. (2003) Medición de la captura de carbono en ecosistemas forestales tropicales de Colombia: Contribuciones para la mitigación del cambio climático. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín – Centro Andino para la economía en el medio ambiente (CAEMA). *Facultad Nacional de Agronomía*, 46 (1), 314.
- Ospina, A. (2006). *Agroforestería, aportes conceptuales, metodológicos y prácticos para el estudio agroforestal. Asociación del colectivo de agroecología del suroccidente colombiano*. Recuperado de: http://ecuadorforestal.org/wp-content/uploads/2010/08/libro_agroforesteria.pdf
- Palacio, J. D. & Fernández, J. F. (2006). Estado de la investigación en genética de la conservación de los robles (Fagaceae) en Colombia. En J. D. Palacio & J. F. Fernández. *I Simposio Internacional de Roble y Ecosistemas Asociados* (pp. 57-70). Bogotá, Cundinamarca.
- Pandey, D. (2002). Carbon sequestration in agroforestry systems. *Climate Policy*, 2 (4), 367–377.
- Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC). (2001). *Resumen del Grupo III del IPCC*. Recuperado de www.greenfacts.org/es/cambioclimatico/images/ipcc_wg1/figspm_2s.htm
- Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC). (2007). *Cambio climático 2007 Informe de síntesis: Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de expertos sobre el Cambio*

Climático. Recuperado de: http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_sp.pdf

- Parresol, B. (1999). Assessing tree and stand biomass: A review with examples and critical comparisons. *Forest Science*, 45 (4), 573–593.
- Pavón, N.P.; Moreno, C. & Ramírez, A. (2012). Biomasa de raíces en un bosque templado con y sin manejo forestal en Hidalgo, México. Chapingo. *Ciencias Forestales y del Ambiente*, 18 (3), 310.
- Pérez, C.A.; Villalba, J. & Almanza, M. (2013). Fenología del roble (*Quercus humboldtii* bonp land) en Popayán (Cauca, Colombia). *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 2 (145-154), 145-154.
- Pérez, M. & Díaz, J. (2010). *Estimación del carbono contenido en la biomasa forestal aérea de dos bosques andinos en los departamentos de Santander y Cundinamarca*. (Tesis de Pregrado), Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia.
- Plan Frutícola Nacional (2006). *Diagnóstico y análisis de los recursos para la fruticultura en Colombia*. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural.
- Raich, J. (1983). Effects of Forest Conversion of the Carbon Budget of a Tropical Soil. *Biotropica*, 15 (3), 177-184.
- Ramos, R. (2003). *Fraccionamiento del carbono orgánico del suelo en tres tipos de uso de la tierra en fincas ganaderas de San Miguel de Barranca*. (Tesis de Maestría), Escuela de Postgrado: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Turrialba, Costa Rica
- Romero, J. (2012). *El bosque Alto-Andino: una oportunidad para llevar al educando al aprendizaje significativo y a las estrategias de conservación*. (Tesis de Maestría), Facultad de Ciencias: Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Cundinamarca.
- Rügnitz Tito, M.; Chacón León, M. & Porro, R. (2009). *Guía para la determinación de carbono en pequeñas Centro Mundial Agroforestal (ICRAF)*. Recuperado de: http://www.katoombagroup.org/documents/tools/ICRAF_GuiaDeterminacionCarbono_esp.pdf

- Ruiz, M, García, F. & Sayer, J. (2007). Los servicios ambientales de los bosques. *Ecosistemas*, 16 (3), 81-90.
- Saavedra, F. (2010). Crisis ambiental y cambio climático en la política global: Un tema crecientemente complejo para América latina. *Universum*, 25 (2), 58-60.
- Salgado, J. (2010). *Fijación de carbono en biomasa aérea y rentabilidad financiera de sistemas agroforestales con café en Turrialba, Costa Rica y Masatepe, Nicaragua*. (Tesis de Maestría), Escuela de postgrado: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Turrialba, Costa Rica.
- Sánchez, P. (1995). Science in agroforestry. *Agroforestry Systems*, 30 (1), 5-55.
- Sánchez, F.G. & Eaton, R. (2001). Sequestering carbon and improving soils: Benefits of mulching and incorporatin forest slash. *Journal of Forestry*, 99 (1), 32-36.
- Sanford, R. & Cuevas, E. (1996). *Root growth and rhizosphere interactions in tropical forests*. In: Mulkey, S., Chazdon, R. & Smith, A. (eds). *Tropical forest plant ecophysiology*. New York: Springer.
- Schimel, D. (1995). Terrestrial Ecosystems and the Carbon Cycle. *Global Change Biolog*, 1 (1), 77-91.
- Segura, M. (1997). *Almacenamiento y fijación de carbono en Quercus costarricenses, en un bosque de altura en la cordillera de Talamanca, Costa Rica*. (Tesis de Pregrado), Facultad de la Tierra y el Mar: .Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica.
- Segura, M. & Andrade, H. (2012). Huella de carbono en cadenas productivas de café (*Coffea arabica* L.) con diferentes estándares de certificación en Costa Rica. *Luna Azul*, (35), 60-77.
- Sierra, C. A, Del Valle, J. & Orrego, S. (2001). Ecuaciones de biomasa de raíces y sus tasas de acumulación en bosques sucesionales y maduros tropicales de Colombia. Recuperado de: http://www.uach.cl/procarbono/pdf/simposio_carbono/18_Sierra.PDF
- Smith, T.; Cramer, R., Dixon, R.; Leemans, R.; Neilson, P. & Solomon, A. (1993). *The Global Terrestrial Carbon Cycle*. In Wisniewski, J. & Sampson, R. (eds). *Terrestrial Biospheric Carbon Fluxes: Quantification and Sources of CO₂*. Netherlands: Springer.

- Snowdon, P., Raison, J., Keith, K., Ritson, P., Grierson, M., Montagu, K., Adams, M... Eamus, D. (2001). Protocol for sampling tree and stand biomass. *National carbon accounting system technical report*, (31), 1-10.
- Somarriba, E. (1992). Revisiting the past: an essay on agroforestry definition. *Agroforestry Systems*, 19 (3), 233-240.
- Soto-Pinto, L., Anzueto M., Mendoza, J., Jiménez, G., Ferrer & De Jong, B. (2010). Carbon sequestration through agroforestry in indigenous communities of Chiapas, Mexico. *Agroforestry Systems* (78), 39–51.
- Trumbmore, S., Davidson, E., Barbosa de Camargo, P., Nepstad, D. & Martinelli, L. (1995). Below ground cycle of carbon in forests and pastures of Eastern Amazonia. *Glob. Biochem. Cyc* (9), 515-528.
- Tudela, F. (2000). *Diez tesis sobre desarrollo y medio ambiente en américa latina y el caribe*. Recuperado de: <http://www.bdigital.unal.edu.co/48479/1/boletin10.pdf>
- Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN). (2003). *Directrices para emplear los criterios de la Lista Roja de la UICN a nivel nacional y regional – versión 3.0*. Recuperado de: <http://www.iucnredlist.org/%20technical-documents/categories-and-criteria>
- United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). (1992). *Naciones unidas*. Recuperado de: <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf>
- United Nations Framework Convention on Climate Change. (UNFCCC). (2008). Los mecanismos de kyoto. Recuperado de: http://unfccc.int/portal_espanol/informacion_basica/protocolo_de_kyoto/organizacion/mecanismos/items/6219.php
- Van Ginkel, J., Whitmore, A. & Gorissen, A. (1999). *Lolium perenne* grasslands may function as a sink for atmospheric carbon dioxide. *Journal of Environmental Quality*, (28), 1580-1584.
- Van Noordwijk, M., Brouwer, G., Meijboom, F., Do Rosario M., Oliveira, G. & Bengough, A. (2000). Trench profile techniques and core break methods (Chapter 7). In Smit, A., Bengough, A., Engels, C., Van Noordwijk, M., Pellerin, S. & Van de Geijn, S. (eds). *Root methods: a handbook*. Springer.

- Vásquez, G. (1987). Crecimiento de un bosque de guandal explotado en el litoral pacífico colombiano. Medellín. (Trabajo de Pregrado), Facultad de Ciencias Agrarias: Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Antioquia.
- Victorino, A. (2011). *Bosques para las personas. Memorias del año internacional de los bosques*. Recuperado de: file:///E:/descargas/Bosques_para_las_personas.pdf
- Vine, E., Sathaye, J. & Makundi, W. (1999). *Guidelines for the monitoring, evaluation, reporting, verification and certification of forestry projects for climate change mitigation. Environmental Energy Technologies Division*. Recuperado de: <http://infohouse.p2ric.org/ref/16/15081.pdf>
- Vogt, K., Vogt, D. & Bloomfield, J. (1998). Analysis of some direct and indirect methods for estimating root biomass and production of forests at an ecosystem level. *Plant and Soil*, (200), 71-89.
- Watson, A., Bakker, A., Ridgwell, P., Boyd, W. & Law, S. (2000). Effect of iron supply on Southern Ocean CO₂ uptake and implications for glacial CO₂. *Nature*, (407), 730–733.
- Yaranga, R. & Custodio, M. (2013). Almacenamiento de carbono en pastos naturales altoandinos. *Scientia Agropecuaria*, (4), 314.
- Zanabria, R. & Cuellar, J. (2015). Carbono total almacenado en los depósitos de diferentes sistemas de uso de tierra del ecosistema alto andino, Valle del Mantaro, Junín. *Xilema*, 28 (1), 43-52.

	SISTEMA DE GESTION DE LA CALIDAD FORMATO DE AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	Página 1 de 3
		Código: GB-P04-F03
		Versión: 02

Los suscritos:

DIEGO FELIPE BELTRÁN BARRERA	con C.C N°	1.110.531.463 de Ibagué
ADRIANA MARCELA ERAZO GARCÍA	con C.C N°	1.110.534.315 de Ibagué
_____	con C.C N°	_____
_____	con C.C N°	_____
_____	con C.C N°	_____

Manifiesto (an) la voluntad de:

Autorizar

No Autorizar Motivo: _____

La consulta en físico y la virtualización de **mi OBRA**, con el fin de incluirlo en el repositorio institucional de la Universidad del Tolima. Esta autorización se hace sin ánimo de lucro, con fines académicos y no implica una cesión de derechos patrimoniales de autor.

Manifestamos que se trata de una OBRA original y como de la autoría de LA OBRA y en relación a la misma, declara que la UNIVERSIDAD DEL TOLIMA, se encuentra, en todo caso, libre de todo tipo de responsabilidad, sea civil, administrativa o penal (incluido el reclamo por plagio).

Por su parte la UNIVERSIDAD DEL TOLIMA se compromete a imponer las medidas necesarias que garanticen la conservación y custodia de la obra tanto en espacios físico como virtual, ajustándose para dicho fin a las normas fijadas en el Reglamento de Propiedad Intelectual de la Universidad, en la Ley 23 de 1982 y demás normas concordantes.

La publicación de:

Trabajo de grado	<input checked="" type="checkbox"/>	Artículo	<input type="checkbox"/>	Proyecto de Investigación	<input type="checkbox"/>
Libro	<input type="checkbox"/>	Parte de libro	<input type="checkbox"/>	Documento de conferencia	<input type="checkbox"/>
Patente	<input type="checkbox"/>	Informe técnico	<input type="checkbox"/>		
Otro: (fotografía, mapa, radiografía, película, video, entre otros)					<input type="checkbox"/>

Fecha Versión 02: 04-11-2016

	SISTEMA DE GESTION DE LA CALIDAD FORMATO DE AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	Página 2 de 3
		Código: GB-P04-F03
		Versión: 02

Producto de la actividad académica/científica/cultural en la Universidad del Tolima, para que con fines académicos e investigativos, muestre al mundo la producción intelectual de la Universidad del Tolima. Con todo, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada con arreglo al artículo 30 de la Ley 23 de 1982. En concordancia suscribo este documento en el momento mismo que hago entrega del trabajo final a la Biblioteca Rafael Parga Cortes de la Universidad del Tolima.

De conformidad con lo establecido en la Ley 23 de 1982 en los artículos 30 “...**Derechos Morales. El autor tendrá sobre su obra un derecho perpetuo, inalienable e irrenunciable**” y 37 “...**Es lícita la reproducción por cualquier medio, de una obra literaria o científica, ordenada u obtenida por el interesado en un solo ejemplar para su uso privado y sin fines de lucro**”. El artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, “**los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores**” y en su artículo 61 de la Constitución Política de Colombia.

- Identificación del documento:

CAPTURA DE CARBONO EN RAÍCES FINAS Y ESTRUCTURALES EN BOSQUES ALTO-ANDINOS Y SISTEMAS AGROFORESTALES EN ASOCIO CON ÁRBOLES DISPERSOS Y CULTIVOS EN SANTA ISABEL, TOLIMA

Título completo: Trabajo de grado presentado para optar al título de:

INGENIERO FORESTAL

- Proyecto de Investigación correspondiente al Programa (No diligenciar si es opción de grado “Trabajo de Grado”):

- Informe Técnico correspondiente al Programa (No diligenciar si es opción de grado “Trabajo de Grado”):

- Artículo publicado en revista:

- Capítulo publicado en libro:

- Conferencia a la que se presentó:

Fecha Versión 02: 04-11-2016



	SISTEMA DE GESTION DE LA CALIDAD FORMATO DE AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	Página 3 de 3
		Código: GB-P04-F03
		Versión: 02

Quienes a continuación autentican con su firma la autorización para la digitalización e inclusión en el repositorio digital de la Universidad del Tolima, el:

Día: 30 Mes: JUNIO Año: 2017

Autores:

Firma

Nombre:	DIEGO FELIPE BELTRÁN BARRERA		C.C.	1.110.531.463
Nombre:	ADRIANA MARCELA ERAZO GARCÍA		C.C.	1.110.534.315
Nombre:	_____	_____	C.C.	_____
Nombre:	_____	_____	C.C.	_____

El autor y/o autores certifican que conocen las derivadas jurídicas que se generan en aplicación de los principios del derecho de autor.

Fecha Versión 02: 04-11-2016