

EVALUACIÓN DE CAPTURA DE CARBONO EN SISTEMAS PRODUCTIVOS DE
CAFÉ (*Coffea arabica* L.), MUNICIPIO DE CONSACÁ, NARIÑO - COLOMBIA.

MARIA ALEJANDRA JURADO RIASCOS

UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE CIENCIAS AGRÍCOLAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA AGROFORESTAL
SAN JUAN DE PASTO

2019

EVALUACIÓN DE CAPTURA DE CARBONO EN SISTEMAS PRODUCTIVOS DE
CAFÉ (*Coffea arabica* L.), MUNICIPIO DE CONSACÁ, NARIÑO - COLOMBIA.

MARIA ALEJANDRA JURADO RIASCOS

Trabajo de grado para optar al título de
INGENIERO AGROFORESTAL

Presidente

HÉCTOR RAMIRO ORDÓÑEZ JURADO PhD.

UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE CIENCIAS AGRÍCOLAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA AGROFORESTAL
SAN JUAN DE PASTO

2019

NOTA DE RESPONSABILIDAD

“Las ideas y conclusiones aportadas en este Trabajo de Grado, son de responsabilidad exclusiva de los autores”

Artículo 1° del Acuerdo No. 324 de octubre 11 de 1966 emanado por el Honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño.

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma Presidente

Firma Jurado

Firma Jurado

AGRADECIMIENTOS

Especialmente a Dios y a mi Familia por su apoyo durante toda nuestra carrera.

A Héctor Ramiro Ordoñez Jurado, PhD. Presidente de Tesis. Por sus aportes y colaboración.

A Tulio Cesar Lagos director del grupo de investigación en Producción de Frutales Andinos por la colaboración prestada para la realización de este estudio.

A la Vicerrectoría de investigaciones, postgrados y relaciones internacionales por la financiación del proyecto de investigación del cual surgió este trabajo.

.

A la Universidad de Nariño, a la Facultad de Ciencias Agrícolas, al Programa de Ingeniería Agroforestal y los Laboratorios de Docencia.

Y a todas las personas que de una y otra forma colaboraron y apoyaron para que este proyecto se desarrolle a plena satisfacción.

DEDICATORIA

A Dios por la vida, por darme fortaleza, sabiduría, entendimiento y permitirme alcanzar un logro más en mi vida.

A mi madre Rosario Riascos que con perseverancia y sacrificio, amor y dedicación logra que mis sueños y mis metas se hagan realidad.

A mi padre, hermanos y tíos por su apoyo moral y cariño.

A Gabriel Eraso, por brindarme su amor, su apoyo y comprensión en los momentos difíciles y ayudarme a cumplir mis metas.

A todos mis maestros, asesores, por todas sus enseñanzas y apoyo incondicional, que Dios los bendiga, y continúen formando profesionales íntegros.

Y en general a todas las personas que hicieron parte de este proceso.

Gracias...

Evaluación de captura de carbono en sistemas productivos de café (*Coffea arabica* L.), Consacá, Nariño, Colombia

Carbon storage evaluation in coffee systems (*Coffea arabica* L.), Consacá, Nariño,
Colombia

María Alejandra Jurado Riascos¹, Héctor Ramiro Ordoñez Jurado²

¹ Estudiante de Ingeniería Agroforestal. Facultad de Ciencias Agrícolas. Universidad de Nariño, San Juan de Pasto, Colombia. marialeja.j@gmail.com.

² Profesor Tiempo Completo I.F. Ph.D. Facultad de Ciencias Agrícolas. Universidad de Nariño, San Juan de Pasto, Colombia. hectorramiro@hotmail.com.

RESUMEN

Actualmente, las regiones productoras de café están siendo afectadas por los gases de efecto invernadero (GEI); una forma de mitigar la emisión de GEI es a través de la captura de carbono. Se realizó la presente investigación, con el fin de estimar el carbono almacenado en biomasa aérea y bajo el suelo en el ecotopo 221A correspondiente al municipio de Consacá Nariño; donde se evaluó cuatro sistemas productivos de café de cuatro años de edad, mediante un Diseño de Bloques Completos al Azar (DBCA); los bloques están determinados por tres rangos altitudinales: I (>1800); II (1800-1500) y III (<1500) msnm; y los tratamientos corresponden a: café a libre exposición (T1), café-limón (T2), café-guamo (T3) y café-carbonero (T4). Para determinar el carbono almacenado se empleó el método no destructivo utilizando ecuaciones alométricas de cada especie; los resultados mostraron diferencias estadísticas significativas en el rango >1800 msnm (109,81 t ha⁻¹) y el más bajo almacenamiento de carbono en el rango <1500 msnm (42,39 t ha⁻¹); por otra parte, los resultados no mostraron diferencias estadísticas significativas en los sistemas, sin embargo, se cuantificó el mayor almacenamiento de carbono en T4 (74,82 t ha⁻¹) y el valor más bajo en T3 (56,56 t ha⁻¹). Lo anterior indica que la captura de carbono es mayor en sistemas de café asociados a especies leñosas a alturas superiores a 1800 msnm.

Palabras clave: Captura de carbono, carbono, ecuación alométrica, sistemas productivos de café.

ABSTRACT

Nowadays, coffee producing regions are being affected by greenhouse gases (GHG); one way to mitigate GHG emissions is through carbon storage. This investigation was carried out in order to estimate the stored carbon in above and belowground biomass in the ecotope 221A corresponding to Consacá Nariño; where four coffee productive systems of four years old were evaluated through a Random Blocks Design (RBD); the blocks are determined by three altitudinal ranges: I (> 1800); II (1800 - 1500) and III (<1500) masl; and the treatments correspond to: full sunlight exposure coffee (T1), lemon-coffee (T2), guamo-coffee (T3) and carbonero-coffee (T4). To determine the stored carbon, the non-destructive methodology was used, as well as the allometric equations of each specie; These results showed significant statistical differences in the range >1800 masl (109.81 t ha^{-1}) and the lowest carbon storage in the range <1500 masl (42.39 t ha^{-1}); On the other hand, the results did not show significant statistical differences in the systems, however, the highest carbon storage was quantified in T4 (74.82 t ha^{-1}) and the lowest value in T3 (56.56 t ha^{-1}). What is mentioned before indicates that carbon capture is higher in coffee systems associated with woody species at altitudes above 1800 masl.

Key words: Carbon storage, carbon, allometric equation, coffee productive systems.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCION.....	12
2. MATERIALES Y METODOS.....	13
2.1. Localización.....	13
2.2. Fase de campo.....	13
2.3. Procedimiento.....	14
2.3.1. Unidades de muestreo.....	14
2.3.2. Variable dasometrica.....	14
2.3.3. Suelo.....	15
2.3.4. Carbono almacenado en el café y árboles de sombrío.....	15
2.3.5. Carbono almacenado en raíces.....	16
2.3.6. Carbono almacenado en el suelo.....	16
2.4. Análisis estadístico.....	16
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	17
3.1.1. Carbono almacenado en biomasa aérea (café y árboles de sombrío).....	17
3.1.2. Carbono almacenado en biomasa bajo el suelo (raíz y suelo).....	18
3.1.3. Carbono almacenado en biomasa aérea y bajo el suelo.....	20
4. CONCLUSIONES.....	21
5. REFERENCIAS BIBLIGRÁFICAS.....	21

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Sistemas productivos de café, municipio de Consacá, Nariño.	13
Tabla 2. Ecuaciones alométricas utilizadas por especie para la estimación de biomasa.	15

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Prueba de comparación de Tukey para el almacenamiento de carbono en el componente café y árboles de sombrío en cuatro sistemas productivos de café.....	17
Figura 2. Prueba de comparación de Tukey para el almacenamiento de carbono en la raíz en cuatro sistemas productivos de café.....	18
Figura 3. Prueba de comparación de Tukey para el almacenamiento de carbono en el suelo en tres rangos altitudinales.	19
Figura 4. Prueba de comparación de Tukey para el almacenamiento de carbono en biomasa aérea y bajo el suelo en tres rangos altitudinales.....	20

GLOSARIO

Sistema: Los sistemas son conjuntos de componentes que interactúan unos con otros; en donde se cuenta con entradas y salidas que generalmente tienen una retroalimentación que permite realizar ajustes para corregir o fortalecer los procesos.

Cambio climático: El cambio climático ocupa hoy uno de los primeros lugares entre los problemas que afectan a la humanidad, por sus efectos medioambientales y, sobre todo, porque su principal determinante es el incremento de los gases de efecto invernadero, resultantes de las actividades humanas.

Gases de efecto invernadero (GEI): cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables.

Ciclo del carbono: se inicia con la fijación del dióxido de carbono atmosférico mediante la fotosíntesis que realizan las plantas y algunos microorganismos. En la fotosíntesis, el dióxido de carbono y el agua reaccionan para formar carbohidratos y a la vez, liberar oxígeno, que va a la atmósfera. Parte de los carbohidratos se consumen directamente para suministrar energía a la planta y el dióxido de carbono que así se forma, se libera a través de sus hojas o de sus raíces.

Captura de carbono: es el CO₂ secuestrado por las plantas es el resultado de las diferencias entre el CO₂ atmosférico absorbido durante el proceso de la fotosíntesis y el CO₂ emitido durante la respiración. Esta diferencia es convertida en biomasa y suele oscilar entre el 45% y 50% del peso seco de la planta.

Almacenamiento de carbono: proceso mediante el cual se capta y se almacena una gran cantidad de dióxido de carbono (CO₂) de la atmósfera de la que se libera hacia la misma. Las plantas durante la fotosíntesis, absorben el CO₂ y lo convierten en O₂, pero una parte del C queda inmovilizado en sus tejidos y otra parte regresa al suelo en forma de exudados.

1. INTRODUCCION

El calentamiento global, como resultado del constante aumento de las concentraciones de carbono (CO₂), se ha convertido en un grave problema (Santibañez, 2014); existe un grado alto de incertidumbre con respecto a la forma como se verán afectadas las regiones productoras del grano, y cómo la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) afectará a la producción global de café.

Una forma de mitigar los efectos de los GEI, es a través de la captura del carbono, manteniéndolo el mayor tiempo posible secuestrado, ya sea en el suelo o en forma de biomasa. Una alternativa son los sistemas agroforestales (SAF), con asociaciones de árboles de alto potencial de almacenamiento de carbono (Ramachandran y Nair 2014), donde la diversidad de especies arbóreas pueda ser establecida en diferentes diseños agroforestales, por ejemplo bosque protectores, barreras rompevientos, y árboles dentro de los cultivos, entre otros (Farfán, 2012).

La cuantificación del carbono almacenado especialmente en cultivos de alto valor comercial como el café, posibilita el desarrollo de modelos productivos eficientes en el uso del carbono, siendo esta afirmación apoyada por Isaza, (2014) quien menciona que “Este tipo de evaluaciones son insumo para generar alternativas y modelos de producción que permitan hacer una gestión eficiente del carbono, que en el futuro pueden recibir beneficios económicos por concepto de servicios ambientales”.

Dada la importancia y las consideraciones expuestas, esta investigación tuvo como objetivo, evaluar la captura de carbono en biomasa aérea y bajo el suelo en cuatro sistemas productivos de café en tres pisos altitudinales, ubicados en el ecotopo 221A, municipio de Consacá, departamento de Nariño.

2. MATERIALES Y METODOS

2.1. Localización.

El estudio se realizó en el Municipio de Consacá, Nariño, el cual tiene una extensión aproximada de 96 Km²; una altitud entre 1200 y 4260 msnm; temperatura promedio de 20°C; precipitación de 1161 mm año⁻¹; humedad relativa promedio del 80% (Plan de Desarrollo Territorial, municipio de Consacá, 2019). Según CORPONARIÑO (2014), los suelos presentan características homogéneas, de textura limosa y color negro. De acuerdo con el sistema de clasificación ecológica de Holdridge (1996); el área de estudio pertenece a la zona de vida de bosque húmedo premontano (bh-PM).

2.2. Fase de campo.

Se seleccionaron tres lotes experimentales; ubicados en la localidad de San Antonio a una altitud de 1989 msnm, Bombona a una altitud de 1668 msnm y Cariaco Bajo a una altura de 1577 msnm.

Cada lote experimental cuenta con un área de 10000 m², donde se establecieron cuatro tratamientos (Tabla 1), con un área de 2500 m²; Se utilizó un diseño de Bloques Completos al Azar (BCA); los bloques fueron definidos por la altitud sobre el nivel del mar y los tratamientos correspondieron a los sistemas productivos de café.

Tabla 1. Sistemas productivos de café, municipio de Consacá, Nariño.

Tratamiento	Componentes	Distancia de siembra (m)	Sistema de siembra	Plantas (ha)
T1	Café sin sombrío	Café: 1,3 x 1,3	Triángulo	6828
T2	Café con sombrío de limón	Café: 1,3* 1,3	Triángulo	6672
		Limón: 8*8	Cuadro	156
T3	Café con sombrío de guamo	Café: 1,3*1,3	Triángulo	6705
		Guamo: 9*9	Cuadro	123
T4	Café con sombrío de carbonero	Café: 1,3*1,3	Triángulo	6759
		Carbonero: 12x12	Cuadrado	69

Las plantas de café establecidas corresponden a la variedad castillo y las especies utilizadas como sombrío correspondieron a: aguacate (*Persea americana* Mill.), limón tahití (*Citrus limon* (L.) Burm), guamo (*Inga sp*), y carbonero (*Albizia carbonaria* Britton). Los sistemas tienen una edad de cuatro años de establecidos. Para esta investigación se consideraron las especies: limón (tratamiento 2), guamo (tratamiento 3), carbonero (tratamiento 4); para la priorización de las especies se tuvo en cuenta el grado de adaptabilidad de estas en el sistema.

2.3. Procedimiento.

Para la evaluación de la captura de carbono en los sistemas productivos de café, se empleó el método no destructivo. Para estimar el carbono almacenado, se aplicaron las ecuaciones alométricas reportadas por Quilio *et al.* (2010); Álvarez *et al.* (2011); Segura y Andrade (2008) e Penman *et al.* (2003). Con estas ecuaciones; se determinó la biomasa y almacenamiento de carbono de las especies leñosas, tomando como referencia la metodología recomendada por Rüginitz *et al.* (2009) del Centro Mundial de Agroforestería (ICRAF).

2.3.1. Unidades de muestreo.

Para determinar las unidades de muestreo, se adaptó el método de muestreo utilizado por Castellanos *et al.* (2010) del Centro de Estudios Ambientales y de Biodiversidad. Universidad del Valle de Guatemala (CEAB-UVG); el cual considera la estratificación y la distribución de puntos de muestreo de manera aleatoria. El primer paso consistió en dividir el área de cada uno de los tratamientos del lote experimental en unidades de muestreo. En este caso se tomaron tres puntos al azar por tratamiento y en cada punto seleccionado se trazó tres subparcelas anidadas en círculo concéntrico.

2.3.2. Variable dasométrica.

Para el componente café, se seleccionaron tres parcelas de 28 m² por tratamiento, y en estas se registró el valor del diámetro (cm) de cada planta de café a 15 cm del suelo. Para el

componente árboles de sombrío, por cada tratamiento, se seleccionaron tres parcelas de 250 m², y se registró el valor del diámetro (cm) de cada árbol a 1,30 m (DAP).

2.3.3. Suelo.

Para la toma de muestras de suelo, por cada tratamiento se seleccionó cinco sitios distribuidos al azar, y se tomaron 200 g por muestra a 30 cm de profundidad; estas fueron llevadas al laboratorio especializado de suelos de la Universidad de Nariño; donde se determinó el porcentaje de carbono orgánico.

2.3.4. Carbono almacenado en el café y árboles de sombrío.

El valor de la biomasa de los árboles de café y sombra se obtuvo a través de las ecuaciones alométricas formuladas para de cada especie (Tabla 2). La ecuación establecida para limón, está dada de manera general para frutales y la empleada en carbonero es la utilizada en especies arbóreas de bosque húmedo premontano (Álvarez *et al.*, 2011).

Tabla 2. Ecuaciones alométricas utilizadas por especie para la estimación de biomasa.

Ecuación alométrica	r ²	Especie	Observación	Fuente
$BA = (0,1955 * D_{15}^{1,648}) * 1,266$	0,93	Café (<i>Coffea arabica</i> L.)	BA= Biomasa aérea (kg/árbol) D ₁₅ = diámetro del tronco en (cm) medido a 15 cm del suelo.	(Quilio <i>et al.</i> , 2010)
$BA = 0,01513 * D^{3,0054}$	0,94	Guamo (<i>Inga sp.</i>)	D=diámetro a 1,30 m (DAP)	(Quilio <i>et al.</i> , 2010)
$BA = EXP(-1,8656 + (2,3733 * LN(D)))$	0,89	Carbonero (<i>Albizia carbonaria</i> Britton.)	D=diámetro a 1,30 m (DAP)	(Alvarez <i>et al.</i> , 2011)
$BA = 10^{-1,11 + (2,64 * LOG(D))}$	0,95	Limón (<i>Citrus limon</i> (L) Burm)	D=diámetro a 1,30 m (DAP)	(Segura y Andrade, 2008)
$R_{raíces} = e^{(-1,06 + 0,88 * LN(BA))}$	0,84	Biomasa de raíces a	BA=Biomasa	(Penman <i>et</i>

La estimación del carbono almacenado en el café y árboles de sombrío, se realizó multiplicando el valor de la biomasa obtenida a través de las ecuaciones alométricas de cada especie por la fracción de carbono por defecto 0,5 (Penman *et al.*, 2003).

2.3.5. Carbono almacenado en raíces.

Para la determinación de carbono en la raíz, primero se calculó la biomasa aérea del árbol a través de las ecuaciones alométricas de cada especie, el valor obtenido se reemplazó en la ecuación alométrica para la biomasa de raíces dada de manera general por el Penman *et al.* (2003) y posteriormente este se multiplico por la fracción de carbono de 0,5.

2.3.6. Carbono almacenado en el suelo.

Para calcular la densidad de carbono en el suelo se multiplicó la profundidad de muestreo por la densidad aparente, y esto a la vez por el porcentaje de carbono orgánico en el suelo obtenido a través de las muestras analizadas en el laboratorio.

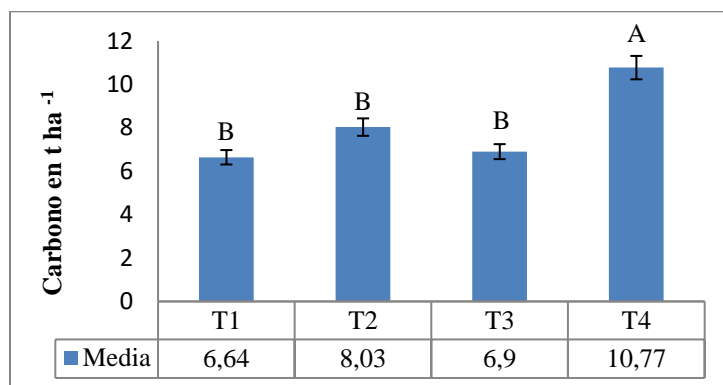
2.4. Análisis estadístico.

Los datos obtenidos en campo fueron sometidos a análisis de varianza (ANDEVA) con una probabilidad del 95%, y para las variables que presentaron diferencias estadísticas significativas se aplicó la prueba de comparación de medias de Tukey ($\alpha = 0,05$). Los datos fueron agrupados y ordenados en el programa de Excel, y fueron analizados en el programa Infostat versión 2018.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1.1. Carbono almacenado en biomasa aérea (café y árboles de sombrío).

Según el análisis de varianza (ANDEVA), se encontró diferencias estadísticas altamente significativas entre los tratamientos ($p= 0,002$) y al aplicar la prueba de comparación de medias de Tukey, se determinó que T4 (café-carbonero), presento diferencias estadísticas significativas con respecto a los otros tratamientos, con un valor promedio de $10,77 \text{ t ha}^{-1}$, y el valor más bajo de almacenamiento de carbono se obtuvo en T1 con un promedio de $6,64 \text{ t ha}^{-1}$ (Figura 1); estos valores son semejantes a los reportados por Odar, (2018) y Cabrera *et al.*, (2016), en sistemas agroforestales en la provincia de Luya, Amazonas y en las provincias de Jaén y San Ignacio, Cajamarca Perú, donde reportan un valor promedio entre $6,38$ y $6,81 \text{ t ha}^{-1}$, respectivamente.



Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

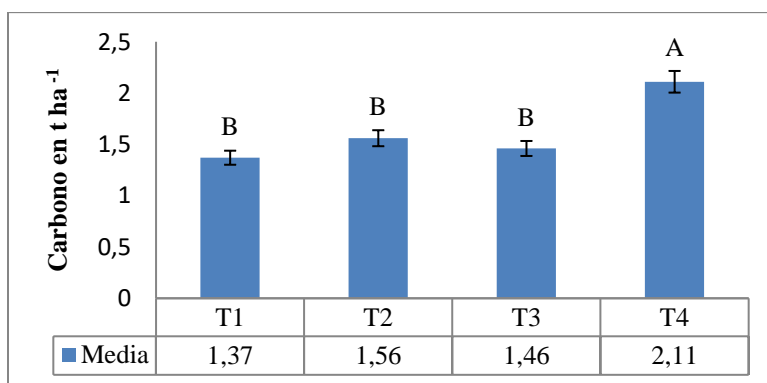
Figura 1. Prueba de comparación de Tukey para el almacenamiento de carbono en el componente café y árboles de sombrío en cuatro sistemas productivos de café.

Valores semejantes al T4, fueron reportados por López (2014) en sistemas con alta densidad de café y árboles de sombrío, donde la vegetación arbórea aporta $8,86 \text{ t ha}^{-1}$ y las plantaciones de café $2,59 \text{ t ha}^{-1}$, sumando un total de $11,45 \text{ t ha}^{-1}$; demostrando que las reservas de carbono son mayores en los sistemas productivos de café con sombra que en plantaciones de café a libre explosión o con poca sombra. Es importante resaltar que la captura de carbono puede aumentar durante la fase de crecimiento del árbol y disminuir de nuevo después de la cosecha o quema del mismo (Kim *et al.*, 2016).

Los resultados sugieren que en sistemas agroforestales de café con leñosas perennes leguminosas, tienen mayores reservas de carbono que el monocultivo de café (Hergoualch *et al.*, 2012; Balaba y Byakagaba, 2015); así mismo los estudios realizados por Ávila *et al.* (2001); Ibrahim *et al.* (2006); Gómez y Oviedo, (2000), reportan que los árboles de grandes dimensiones en altura y diámetro pueden retener carbono en su madera por un tiempo prolongado; en el presente estudio los árboles de carbonero al presentar las mayores dimensiones en altura y diámetro llevaron a un mayor almacenamiento de carbono respecto a las demás especies leñosas.

3.1.2. Carbono almacenado en biomasa bajo el suelo (raíz y suelo).

Raíz. Según el ANDEVA se encontró diferencias estadísticas altamente significativas entre los tratamientos ($p= 0,001$) y al aplicar la prueba de comparación de medias de Tukey se determinó que la mayor cantidad de carbono almacenado en la raíz se obtuvo en T4 con un valor de $2,11 \text{ t ha}^{-1}$; y el sistema que presentó menor almacenamiento de carbono fue T1 con un valor de $1,37 \text{ t ha}^{-1}$ como se observa en la Figura 2; esta variabilidad se debe a la heterogeneidad espacial del desarrollo del sistema radicular, el cual depende de las interacciones de los factores genéticos y ambientales de las especies. De acuerdo a Stokes *et al.* (2008); Katayama *et al.* (2009); De Carvalho *et al.* (2016), indican que la presencia del componente arbóreo promueve diferentes condiciones ambientales debido a la distancia de siembra y características morfológicas que influyen en el patrón de variabilidad espacial.



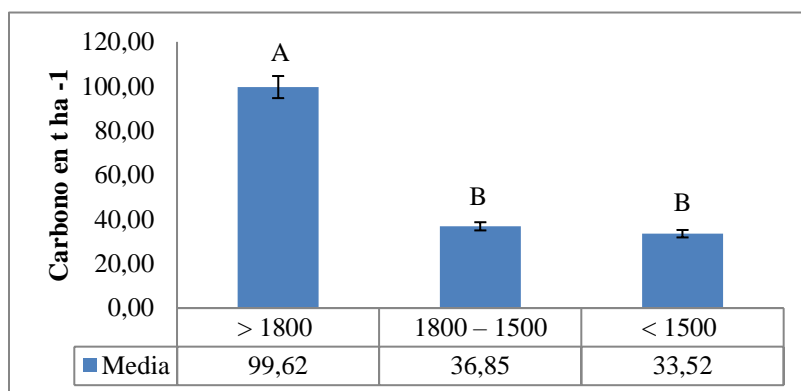
Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Figura 2. Prueba de comparación de Tukey para el almacenamiento de carbono en la raíz en cuatro sistemas productivos de café.

La mayor reserva de carbono en la raíz se evidencio en T4 debido al buen desarrollo radical en las diferentes profundidades, el cual mejora la estructura y porosidad del suelo como lo afirma Ling *et al.* (2017). Por su parte, Ingaramo *et al.*, (2003) y Henríquez *et al.*, (2011) establecieron la relación directa que existe entre la penetración de raíces y el suelo, donde una disminución del espacio poroso genera disminución en el desarrollo radical.

Suelo. Al comparar el carbono almacenado en el suelo y al realizar el ANDEVA, no se encontró diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos ($P= 0,9577$); no obstante se cuantificó el mayor carbono almacenado en T1 ($62,75 \text{ t ha}^{-1}$) y el menor valor en T3 ($48,10 \text{ t ha}^{-1}$).

Según el ANDEVA del carbono almacenado en el suelo en los tres rangos altitudinales, se encontró diferencias altamente significativas ($p= 0,001$); de acuerdo a la prueba de comparación de medias de Tukey (Figura 3), se encontraron diferencias significativas, en donde la mayor cantidad de carbono almacenado se encuentra en altitudes $> 1800 \text{ msnm}$, con un valor promedio de $99,62 \text{ t ha}^{-1}$; en cambio el rango $< 1500 \text{ msnm}$ es el que presento el menor almacenamiento de carbonó con un valor promedio de $33,52 \text{ t ha}^{-1}$.



Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

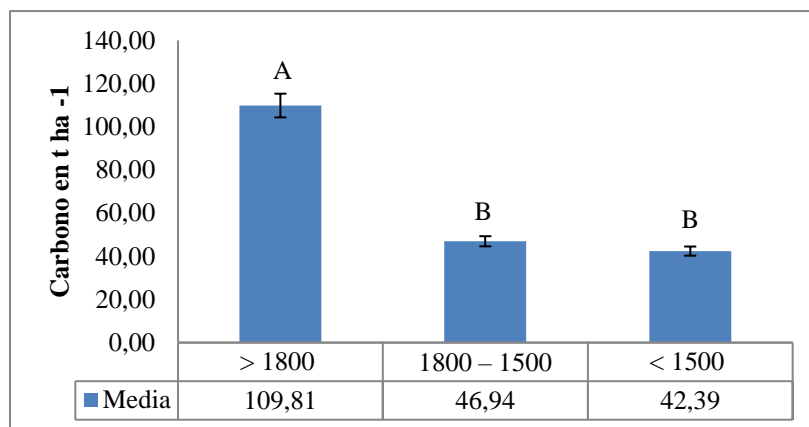
Figura 3. Prueba de comparación de Tukey para el almacenamiento de carbono en el suelo en tres rangos altitudinales.

Según Cabrera *et al.* (2016), la cantidad de carbono almacenado en el suelo está directamente relacionada con el contenido de materia orgánica y la densidad del suelo; esto se ve reflejado en los resultados observados en el rango $> 1800 \text{ msnm}$, estos suelos presentan una densidad de $0,74 \text{ g cc}^{-1}$ en cambio los suelos del rango $< 1500 \text{ msnm}$ se

caracterizan por presentar una densidad $0,83 \text{ g cc}^{-1}$, en donde se encontraron los valores más bajos de almacenamiento de carbono; este resultado puede atribuirse a las condiciones de erosión y pérdida de suelo debido a las prácticas de manejo aplicadas a los sistemas productivos a esa altitud, como lo mencionan Ibrahim *et al.* (2006) y Esquivel (2014), que los procesos de erosión disminuyen la capacidad del suelo para retener carbono.

3.1.3. Carbono almacenado en biomasa aérea y bajo el suelo.

Al realizar el ANDEVA, no se encontró diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos ($P=0,9378$), sin embargo se cuantificó el mayor almacenamiento de carbono en T4 ($74,82 \text{ t ha}^{-1}$) y el menor valor en T3 ($56,56 \text{ t ha}^{-1}$). Mediante el ANDEVA, se contrastó el almacenamiento de carbono en los tres rangos altitudinales, donde se encontró diferencias altamente significativas ($p= 0,001$); y de acuerdo a la prueba de comparación de medias de Tukey, se obtuvo la mayor cantidad de carbono almacenado en altitudes >1800 msnm, con un promedio de $109,81 \text{ t ha}^{-1}$; a diferencia del rango altitudinal <1500 msnm donde se presentó el menor almacenamiento de carbonó con $42,39 \text{ t ha}^{-1}$ como se observa en la Figura 4.



Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Figura 4. Prueba de comparación de Tukey para el almacenamiento de carbono en biomasa aérea y bajo el suelo en tres rangos altitudinales.

Al evaluar el almacenamiento total de carbono se encontró que la mayor capacidad de almacenamiento se presenta a una altitud >1800 msnm y en la asociación café árboles, especialmente café-carbonero; como lo afirman Peng *et al.* (2009); De Carvalho *et al.*

(2016), Hergoualch *et al.*, (2012) “el almacenamiento de carbono depende de las condiciones climáticas; como también de la distribución de carbono en el ecosistema, donde interviene la densidad de plantación, tipo de árboles que conforma el sistema, capacidad de descomposición y presencia de actividad microbiana; factores que promueven una estabilidad del flujo del carbono”.

4. CONCLUSIONES

La captura de carbono en los sistemas productivos evaluados no presentaron diferencias estadísticas significativas, sin embargo, se cuantificó el mayor carbono almacenado en el sistema de café asociado con la especie carbonero con un promedio de 74,82 t ha⁻¹; demostrando que las reservas de carbono son mayores en los sistemas productivos de café asociados con especies leñosas.

El almacenamiento de carbono presento diferencias estadísticas significativas a una altitud > 1800 msnm con un valor promedio de 109,81 t ha⁻¹; esto puede atribuirse a las condiciones topográficas y climáticas presentes, como también a las condiciones físicas, químicas y microbiológicas del suelo.

Los sistemas productivos de café asociados a especies leñosas son de gran viabilidad frente a la captura de carbono, siendo este un servicio ambiental a tener en cuenta en el manejo técnico del cultivo, con el fin de generar ingresos a través del pago por servicios ambientales (PSA), tales como los mercados de carbono que mejoran los medios de sustento de las comunidades locales.

5. REFERENCIAS BIBLIGRÁFICAS

Álvarez, E., Saldarriaga, J., Duque, A., Cabrera, K., Yepes, A., Navarrete, D. & Phillips, J. (2011). Selección y validación de modelos para la estimación de la biomasa aérea en los bosques naturales de Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Bogotá D.C. Colombia. 26 p

- Ávila, G., Jiménez, F., Beer, J., Gómez, M. & Ibrahim, M. (2001). Almacenamiento, fijación de carbono y valoración de servicios ambientales en sistemas agroforestales. *Rev. Agroforestería en las Américas* 8(30): 32-35.
- Balaba, S. & Byakagaba, P. (2015). Soil organic carbon stocks under coffee agroforestry systems and coffee monoculture in Uganda. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 216: 188–193.
- Cabrera, M., Vaca, S., Aguirre, F. & Aguirre, H. (2016). Almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales cafetaleros en las provincias de Jaén y San Ignacio, Cajamarca, Perú. *Rev. Pakamuros* 4 (1): 43-54.
- Castellanos, E., Quilo, A. & Mato, R. (2010). *Metodología para la Estimación del contenido de carbono en bosques y sistemas agroforestales de Guatemala*. 1° ed. Guatemala: Centro de Estudios Ambientales y de Biodiversidad de la Universidad del Valle de Guatemala y CARE-Guatemala. 31p.
- Corporación Autónoma Regional de Nariño (CORPONARIÑO). (2014). Diagnóstico Biofísico y Socioeconómico Municipio de Consacá. Recuperada de <http://corponarino.gov.co/expedientes/intervencion/DIAGNOSTICO%20BIOFISICO%20Y%20SOCIO%20ECONOMICO%20DE%20CONSACA.pdf>
- De Carvalho, L., Cardoso, M., De Sá Mendonça, E., Fernandes, A., Lopes, S. & Oliveira, S. (2016). Trees modify the dynamics of soil CO₂ efflux in coffee agroforestry systems. *Rev. Agricultural and Forest Meteorology*. 224 (1): 30-39. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.05.001>.
- Esquivel, E. (2014). Evaluación de la Sustentabilidad de Plantaciones Dendroenergéticas en la Región Biobío Chile. Tesis doctoral. Universidad de Concepción. Concepción, Chile 93 p.
- Farfán, F. (2012). *Arboles con potencial para ser incorporados en sistemas agroforestales con café*. Chinchiná (Colombia): Centro Nacional de Investigaciones de Café - Cenicafé. 88 p

- Gómez, V & Oviedo, S. (2000). Estudio sobre fijación de carbono en plantaciones de *Pinus ocarpa*, de 11 años de edad en Quinta Buenos Aires, Estelí y Aurora. Managua, Nicaragua. UNA 57 p.
- Henríquez, C., Ortiz, O., Largaespada, K., Portugués, P., Vargas, M., Villalobos, P. & Gómez, D. (2011). Determinación de la resistencia a la penetración, al corte tangencial, densidad aparente y temperatura en un suelo cafetalero, Juan Viñas, Costa Rica. *Rev Agronomía costarricense* 35(1): 175-184.
- Hergoualch, K., Blancart, E., Skiba, U., Henault, C. & Harmand, J. (2012) Changes in carbon stock and greenhouse gas balance in coffee (*Coffea arabica*) monoculture versus an agroforestry system with *Inga densiflora*, in Costa Rica. *Revista Agric Ecosyst Environ* 148 (1):102–110.
- Holdridge, L. (1996). *Ecología basada en zonas de vida*. San José, Costa Rica: Editorial IICA. 219 p
- Ibrahim, M; Mora, J. & Rosales, M. (2006). *Potencialidades de los sistemas silvopastoriles para la generación de servicios ambientales*. Turrialba, Costa: CATIE. 10 p
- Ingaramo, O. E.; Paz G. A.; Dugo, P. M. (2003). Evaluación de la densidad aparente en diferentes sistemas de laboreos de suelo, en el NO de la Península Ibérica. Recuperada de https://www.researchgate.net/publication/315830835_Evaluacion_de_la_densidad_aparente_en_diferentes_sistemas_de_laboreos_de_suelo_en_el_NO_de_la_Peninsula_Iberica
- Isaza, C. (2014). Análisis de oportunidades para la gestión eficiente del carbono en un sistema de producción de café en el departamento de Caldas. Tesis de maestría. Universidad de Manizales. Manizales, Colombia 88p.
- Katayama, A., Kume, T., Komatsu, H., Ohashi, M., Nakagawa, M., Yamashita, M., Otsuki, K., Suzuki, M. & Kumagai, O. (2009). Effect of forest structure on the spatial variation in soil respiration in a Bornean tropical rainforest. *Rev Agricultural and Forest Meteorology*. 149(10): 1666-1673. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.05.007>.

- Kim, D., Thomas, A., Pelster, D., Rosenstock, T. & Sanz, A. (2016). Greenhouse gas emissions from natural ecosystems and agricultural lands in sub-Saharan Africa: synthesis of available data and suggestions for further research. *Biogeosciences*, 13: 4789-4809. doi: <https://doi.org/10.5194/bg-13-4789-2016>
- Ling, Q., Gao, X., Zhao, X., Huang, J., Li, H., Li, L., Sun, W. & Wu, P. (2017). Soil water effects of agroforestry in rainfed jujube (*Ziziphus jujube* Mill.) orchards on loess hillslopes in Northwest China. *Rev. Agriculture. Ecosystems & Environment*. 247 (1): 343-351. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.06.031>.
- López, K. (2014). Determinación de la disponibilidad de carbono según la tipificación de los sistemas agroforestales de café en las sub cuencas del río Yuracyacu y Yanayac, Perú. Tesis de pregrado. Universidad Nacional de San Martín. Moyobamba, Perú 99 p.
- Odar, B. (2018). Evaluación de almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales de café (*coffea spp.*) en el anexo de vilaya, distrito de colcamar, provincia de luya, Amazonas. Tesis de pregrado. Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas. Chachapoyas, Perú. 31 p.
- Penman, J. , Gytarsky, M. , Hiraishi, T. , Krug, T. , Kruger, D. , Pipatti, R. , Buendia, L. , Miwa, K. , Ngara, T. , Tanabe, K. & Wagner, F. (2003). *Good practice guidance for land use, land-use change and forestry*. Japan, Kanagawa Prefecture: Institute for Global Environmental Strategies. 90 p.
- Peng, S., Piao, S., Wang, T., Sun, J. & Shen, Z. (2009). Temperature sensitivity of soil respiration in different ecosystems in china. *Soil Biology and Biochemistry*. 41(5):1008-1014.
- Plan de Desarrollo Territorial Consacá. (PDT). (2019). Municipio de Consacá, Nariño. Plan de Desarrollo Territorial periodo 2016 – 2019. Recuperada de <https://cpd.blob.core.windows.net/test1/52207planDesarrollo.pdf>
- Quilio, A., Castellanos, E. & Pons, D. (2010). *Estudio de línea base de carbono en cafetales*. Guatemala: Universidad del Valle de Guatemala UVG. 48 p.

- Ramachandran, N. & Nair, V. (2014) Solid-fluid-gas: The state of knowledge on carbon sequestration potential of agroforestry systems in Africa. *Rev. Current Opinion in Environmental Sustainability* 6 (1): 22-27.
- Rügnitz, M., Chacón, M. & Porro, R. (2009). *Guía para la Determinación de Carbono en Pequeñas Propiedades Rurales. Centro Mundial Agroflorestal (ICRAF)*. 1° ed. Perú: Consorcio Iniciativa Amazónica (IA). 79 p.
- Santibañez, E. (2014). Captura y almacenamiento de carbono para mitigar el cambio climático: modelo de optimización aplicado a Brasil. *Rev. Inst. Contam. Ambie.* 30 (3): 235-245.
- Segura, M. & Andrade, H. (2008). Cómo Construir Modelos Alométricos de Volumen, Biomasa o Carbono de Especies Leñosas Perennes. *Rev. Agroforesteria en las Américas (CATIE)*. 46: 89-96. doi: <http://hdl.handle.net/11554/6935>
- Stokes, A., Norris, E., Van Beek, H., Bogaard, T., Cammeraat, E., Mickovski, B. & Fourcaud, T. (2008). How Vegetation Reinforces Soil on Slopes. En: Norris J.E. et al. (eds) *Slope Stability and Erosion Control: Ecotechnological Solutions*. pp. 65–118. Dordrecht: Springer.