



Ciencia y Agricultura

ISSN: 0122-8420

ISSN: 2539-0899

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia
(UPTC)

Manchabajoy Cañar, Juan Pablo; Andrade Díaz, Danita; Castillo Marín, Álvaro José
Evaluación de captura de carbono en sistemas productivos de café en el departamento de Nariño
Ciencia y Agricultura, vol. 19, núm. 1, 2022, Enero-Abril, pp. 28-44
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC)

DOI: <https://doi.org/10.19053/01228420.v19.n1.2022.13358>

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=560070786003>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en [redalyc.org](https://www.redalyc.org)

UPTC [redalyc.org](https://www.redalyc.org)

Sistema de Información Científica Redalyc
Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso
abierto



Evaluación de captura de carbono en sistemas productivos de café en el departamento de Nariño

Carbon capture in coffee production systems in the department of Nariño

Juan Pablo Manchabajoy Cañar ^{†1}

Danita Andrade Díaz²

Álvaro José Castillo Marín³



DOI: <https://doi.org/10.19053/01228420.v19.n1.2022.13358>

RESUMEN: Uno de los problemas ambientales más grandes que ha afectado al planeta es el calentamiento global, por las altas concentraciones de carbono (CO₂), esto ha llevado a que cultivos como el café se vean afectados por el cambio climático causado por los gases efecto invernadero (GEI), especialmente por el incremento en la incidencia de plagas y enfermedades. Sin embargo, a través de captura de carbono se contribuye con la mitigación de emisión de GEI. El objetivo de este trabajo fue evaluar el carbono almacenado en la biomasa aérea y bajo el suelo en cuatro sistemas productivos de café castillo de seis años de edad. En un ensayo establecido bajo diseño de bloques completos al Azar (DBCA) con los tratamientos Café a libre exposición (T1), Café-Limón (T2), Café-Guamo (T3) y Café-Carbonero (T4), en tres altitudes: menor a los 1550 msnm, entre los 1550 y 2000 msnm y sobre los 2000 msnm. Se recolectaron datos correspondientes a los diámetros de tallo de plántulas de café y árboles de sombrío con los cuales se aplicaron ecuaciones alométricas para obtener las variables carbono en la biomasa aérea y en raíz y las variables carbono en hojarasca y suelo obtenidos a partir de su materia seca. Se obtuvo diferencias altamente significativas en los cuatro tratamientos evaluados, siendo T4 el que mayor concentración de carbono obtuvo tanto en la biomasa del suelo con 100,14 t ha⁻¹ como en la biomasa aérea con 190,42 t ha⁻¹.

PALABRAS CLAVE: Biomasa, CO₂, Ecuación Alométricas, Sistemas Productivos, Efecto Invernadero.

ABSTRACT: One of the biggest environmental problems that has affected the planet is global warming, due to high concentrations of carbon (CO₂), this has led to crops such as coffee being affected by climate change caused by greenhouse gases (GHG), especially due to the increase in the incidence of pests and diseases. However, carbon capture contributes to the mitigation of GHG emissions. The objective of this work was to evaluate the carbon stored in the above-ground and underground biomass in four six-year-old coffee production systems. In a trial established under Random Complete Blocks Design (DBCA) with the treatments Coffee to free exposure (T1), Coffee-Limon (T2), Coffee-Guamo (T3) and Coffee-Carbonero (T4), in three altitudes: less than 1550 meters above sea level, between 1550 and 2000 meters above sea level and above 2000 meters above sea level. Data corresponding to stem diameters were taken in coffee seedlings and shade trees with which allometric equations were applied to obtain the carbon variables in the aerial and root biomass and the carbon variables in litter and soil obtained from their dry material. Highly significant differences were obtained in the 4 evaluated treatments, being T4 the one with the highest concentration of carbon in the soil biomass with 100.14 t ha⁻¹ and in the aerial biomass with 190.42 t ha⁻¹.

KEY WORDS: Biomass, CO₂, Allometric Equation, Productive Systems, Greenhouse Effect.

FECHA DE RADICACIÓN: 24 de Agosto de 2021 **FECHA DE APROBACIÓN:** 20 de enero de 2022

CÓMO CITAR: Manchabajoy Cañar, J. P., Andrade Díaz, D., & Castillo Marín, . . . Álvaro J. (2022). Evaluación de captura de carbono en sistemas productivos de café en el departamento de Nariño. *Ciencia y Agricultura*, 19(1): 28-44. <https://doi.org/10.19053/01228420.v19.n1.2022.13358>

1. I.A.F.†, Universidad de Nariño, Grupo de Investigación en Producción de Frutales Andinos- GPFA, San Juan de Pasto – Colombia. juampamc2014@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8425-1621>
2. Ph.D (c), Universidad de Nariño, Grupo de Investigación en Producción de Frutales Andinos- GPFA, danitaan@gmail.com;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7579-4739>.
3. MSc, Universidad de Nariño, Grupo de Investigación en Producción de Frutales Andinos- GPFA, jacastillomarin@yahoo.com,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8421-3884>

INTRODUCCIÓN

El cambio climático ha sido ocasionado por la acumulación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) del total de las emisiones de estos gases, el CO₂ constituye aproximadamente el 70%, mientras que cerca del 20% corresponde a CH₄ y un 9% son N₂O. Su alta concentración en el ambiente ha comprendido relaciones complejas entre procesos climáticos, ambientales, económicos, políticos, institucionales, sociales y tecnológicos, ocasionando así una reacción negativa en la producción de alimentos y alterando desfavorablemente los sistemas, disminuyendo su rentabilidad (Patiño et al., 2018).

Una forma de mitigar los efectos del CO₂ atmosférico, es por medio de la captación de carbono, este proceso se puede ver reflejado en el suelo o en la biomasa, donde permanece un largo tiempo secuestrado. Para conseguir una mayor cantidad de carbono capturado se considera la implementación de sistemas agroforestales (SAF), considerando que las especies a implementar tengan un alto potencial para almacenar carbono (Ramachandran y Nair, 2014), además la biodiversidad de las especies en estos sistemas puede ser reflejada en diferentes diseños agroforestales, es decir se pueden emplear cortinas rompevientos, barreras vivas, árboles en medio de los cultivos, entre otros (Farfán, 2012).

Actualmente, hay una tendencia a nivel mundial de que los sistemas productivos de los cultivos de mayor importancia económica estén adaptados al cambio climático y contribuya a su mitigación (FAO, 2016). El desarrollo del sistema productivo de café es una de las principales actividades socioeconómicas del sector agrícola colombiano. El café es uno de los productos más importantes y representativos a la hora de exportar (Matta, 2017). Pese, a los amplios beneficios económicos, la producción a gran escala suele estar centrada en las exportaciones, por su contribución a los suministros locales de alimentos, descuidando la conservación ambiental (FAO, 2016). Por lo que en los sistemas productivos de café se ha propuesto incrementar el uso de especies arbóreas para sombrío, como una estrategia de conservación de la biodiversidad, adaptación al cambio climático, seguridad alimentaria, entre otros servicios de los ecosistemas (FAO, 2016; De Beenhouwer et al., 2016).

El implementar árboles en medio del cultivo de café (SAF-café), se deriva como una alternativa de captura y almacenamiento de carbono y otros gases, que por medio del suelo y la biomasa quedan secuestrados (Castro, 2017; Motta-Delgado y Ocaña-Martínez, 2018). Se han realizado diferentes investigaciones en relación con los SAF-café, donde se analiza las ventajas que recibe cada componente, en especial el café y esto ha permitido demostrar que factores como la fotosíntesis, nutrición, balance hídrico, producción y otros tienen mayores beneficios en comparación a otros sistemas, además de ello es necesario tener en cuenta un balance adecuado en cuanto al porcentaje de

sombra que depende de las características que posea la zona donde se hace la plantación (Montagnini et al., 2015).

Al implementar SAF-café se registra el efecto que tiene la sombra al disminuir la temperatura del suelo, ayudando así a tener un mayor potencial de captura de carbono, esto permite la estabilidad en el flujo de carbono, es decir, el carbono permanece almacenado en el suelo mucho más tiempo en contraste con un sistema de café a libre exposición (Peng et al., 2009; De Carvalho Gomes et al., 2016; Castro, 2017).

En el cultivo de café, cada vez tiene mayor importancia la posibilidad de implementar y desarrollar estrategias o modelos eficientes en el uso o captura de carbono con la potencialidad de recibir beneficios económicos por servicios ambientales. Para ello se han iniciado mediciones de emisiones y capturas que permitan identificar este balance en diferentes etapas del proceso de producción. Las evaluaciones realizadas tienen gran importancia, ya que más adelante serán un insumo que contribuirá a generar alternativas y sistemas de producción, los cuales ayudarán a hacer un uso eficiente del carbono. Aunque en la actualidad no se encuentran aún las restricciones y requerimientos en cuanto a disminuir la huella de carbono, en un futuro muy seguramente el componente “Huella de Carbono” tendrá importancia y será ahí donde se analizarán las posibilidades de mercado a quienes de manera responsable y voluntaria emprendan acciones (Isaza, 2014). Dicho lo anterior, los sistemas agroforestales de café asociación con leñosas perennes, figuran como importantes reservas de carbono, constituyendo una excelente alternativa de producción para café debido a que contribuyen aparte del secuestro de C del suelo y en la biomasa a la reducción de emisiones de dióxido de carbono, principal causante del efecto invernadero, y son una estrategia eficiente en la generación de servicios ecosistémicos en el marco de mecanismos de desarrollo limpio (Jurado et al., 2020).

Adicionalmente, en otros municipios productores del departamento de Nariño, los sistemas productivos de café evaluados bajo diferentes rangos altitudinales mostraron diferencias altamente significativas (Jurado et al., 2020). Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, 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 municipio de Sandoná, departamento de Nariño.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en el Municipio de Sandoná, Nariño, el cual tiene una extensión aproximada de 101 Km²; temperatura que oscila entre los 19.2 °C y 20.5°C; precipitación de 1091 mm año⁻¹; y humedad relativa de 80 % en promedio. Los suelos presentan características homogéneas donde sobresale su textura limosa y color negro (Corponariño, 2008).

Los lotes experimentales se trabaron bajo un diseño de Bloques Completos al Azar (BCA) que estuvieron definidos por tres rangos altitudinales, el primero se ubicó a una altura menor a los 1550 msnm en la finca denominada Las Delicias en las coordenadas 77°29'36" LO, 1°16'03" LN a 1528 msnm, el segundo entre los 1550 y 2000 msnm denominado Maná ubicado en las coordenadas 77°28'59" LO, 1°15'26" LN a una altitud de 1646 msnm y el tercero ubicado en la finca La Cruz sobre los 2000 msnm en las coordenadas 77°27'45" LO y 1°14'53" LN, a una altitud de 2058 msnm. En cada bloque se ubicaron tres lotes experimentales, con un área de 10000 m², en donde se establecieron 4 tratamientos con un área de 2500 m² respectivamente (Tabla I).

TABLA I. Tratamientos evaluados en el municipio de Sandoná, Nariño.

Tratamiento	Componente	Distancia de siembra	Sistema de siembra	Densidad (plantas/ha)
T1	Café a libre exposición	Café: 1,3 m x 1,3 m	Triángulo o tres bolillo	6804
T2	Café con sombrío de limón	Café: 1,3* 1,3m	Triángulo o tres bolillo	6625
		Limón: 8*8m	Cuadro	179
T3	Café con sombrío de guamo	Café: 1,3*1,3 m	Triángulo o tres bolillo	6663
		Guamo: 9*9m	Cuadro	141
T4	Café con sombrío de carbonero	Café: 1,3*1,3m	Triángulo o tres bolillo	6725
		Carbonero: 12 m x 12 m	Cuadrado	79

Las plantas de café establecidas son de la variedad Castillo y las especies utilizadas como sombrío corresponden a: aguacate (*Persea americana* Mill.), limón tahití (*Citrus limon* (L.) Burm), guamo (*Inga sp*), y carbonero (*Albizia carbonaria* Britton). Los sistemas fueron establecidos simultáneamente a comienzos de 2014. Se priorizaron las especies: Limón (tratamiento 2), Guamo (tratamiento 3), Carbonero (tratamiento 4) teniendo en cuenta el grado de adaptabilidad de las especies en el sistema.

La evaluación de la captura de carbono en los sistemas productivos de café, se empleó el método no destructivo, donde utilizó las ecuaciones alométricas reportadas por: Segura & Andrade (2008), Quilio *et al.*, (2010), Álvarez *et al.*, (2011) e IPCC (2003) (Tabla II). Mientras que para la determinación de biomasa y almacenamiento de carbono en suelo se utilizó el procedimiento reportado por Rüginitz *et al.*, (2009).

TABLA II. Ecuaciones alométricas utilizadas por especie para la estimación de biomasa.

Ecuación alométrica	r^2	Especie	Observación	Fuente
$BA = (0,1955 * D^{151,648} * 1,266)$	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 et al., 2010)
$BA = 0,01513 * D^{3,0054}$	0.94	Guamo (<i>Inga</i> sp.)	D = diámetro a 1,30 m (DAP)	(Quilio et al.; 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 et al., 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)
$Raíces = e^{(-1.06 + 0.88 * \ln(BA))}$	0.84	Biomasa de raíces a partir de biomasa arriba del suelo.	BA = Biomasa aérea (kg/árbol)	(IPCC, 2003)

Las unidades de muestreo se determinaron acorde con lo propuesto por Castellanos et al., (2010); considerando la estratificación y la distribución de puntos de muestreo de manera aleatoria. Esta metodología se escogió y adaptó al presente trabajo para lo cual el primer paso consistió en dividir el área de cada uno de los tratamientos en unidades de muestreo, donde se tomó tres puntos al azar y en cada punto seleccionado se trazó tres subparcelas anidadas en círculo concéntrico.

Variables evaluadas

Evaluación de hojarasca y suelo: La instalación de trampas de recolección de hojarasca en las especies arbóreas y plantas de café fueron situadas y ubicadas en tres parcelas de 1 m²; la colecta de la muestra fue después de 30 días, se registró el peso húmedo total de biomasa en campo y se sometió el 10% de cada muestra a secado; después de 48 horas de secado se volvió a registrar su peso.

En componente suelo se seleccionó 5 sitios de muestreo al azar por tratamiento; colectaron 200 g por muestra a 30 cm de profundidad; estas fueron llevadas al laboratorio de la Universidad de Nariño; donde se determinó el porcentaje de carbono orgánico aplicando la metodología denominada método de oxidación húmeda (Walkley – Black, 1934).

Evaluación de los árboles de café: En los cuatro tratamientos de cada bloque se seleccionaron tres parcelas de 28 m², obteniendo una densidad entre 19 y 22 plantas de café y se registró el valor del diámetro (cm) de cada planta a 15 cm del suelo.

Registro de información árboles de sombrío: En sistemas de café con árboles de sombra de cada lote fueron seleccionados tres parcelas de 250 m², registrando el diámetro (cm) de cada árbol a 1,30 m (DAP); se obtuvo una densidad entre 2 a 4 árboles por área de muestreo.

Determinación Biomasa y Carbono Almacenado

Hojarasca: La determinación del carbono almacenado en hojarasca consistió primeramente en obtener el valor de materia seca de la muestra, al dividir el peso seco con peso húmedo. Posteriormente, se calculó la biomasa total seca multiplicando el peso húmedo total, registrado en campo, por la materia seca de la muestra. Se determinó el carbono almacenado al multiplicar la biomasa total seca por la fracción de carbono por defecto 0,5.

Café y árboles de sombrío: El valor de la biomasa de los árboles de café y sombrío se obtuvo colocando el valor del diámetro en las ecuaciones alométricas de cada especie (Tabla II). La ecuación establecida para Limón corresponde a la utilizada de manera general para frutales y en carbonero se utilizó la de especies arbóreas de bosque húmedo pre-montano propuesta por Álvarez et al., (2011).

Para determinar la cantidad de carbono almacenado en el sistema SAF-café, se realizó la multiplicación del valor obtenido de la biomasa de acuerdo a la ecuación alométrica de cada especie, por la fracción de carbono por defecto 0,5.

Almacenamiento total de carbono aéreo: Los resultados de la estimación de carbono de hojarasca, de café y árboles de sombrío obtenidos en las evaluaciones fueron sumadas, obteniendo el carbono aéreo total para cada uno de los tratamientos.

Raíces: La determinación de carbono en la raíz, el primer paso fue calcular la biomasa del árbol por medio de las ecuaciones alométricas de cada especie, este valor obtenido se reemplazó en la ecuación para raíces dada de manera general por el IPPC, (2003), después se multiplico por la fracción de carbono por defecto 0,5.

Suelo: Para calcular la cantidad de carbono en el suelo se multiplico la profundidad de muestreo por la densidad aparente, y esto por el porcentaje de carbono orgánico en el suelo obtenido en el laboratorio.

Análisis Estadístico

Los datos se analizaron a través del ANDEVA bajo el modelo fijo del Diseño de bloques Completos al Azar (DBCA) con una probabilidad del 95%. Para las variables que presentaron diferencias estadísticas significativas se aplicó la prueba de comparación de medias de Tukey ($\alpha = 0,05$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Carbono almacenado en biomasa aérea

Café y árboles de sombrío. En el componente café y árboles de sombrío, se determinó un rango de fijación de carbono de 11,42 a 238,8 t ha⁻¹, encontrándose el mejor resultado en el sistema (T4) con un valor promedio de 190,17 t ha⁻¹, y el valor más bajo almacenamiento de carbono en el sistema (T1) con 11,98 t ha⁻¹ en promedio, tal como se observa en la figura 1.

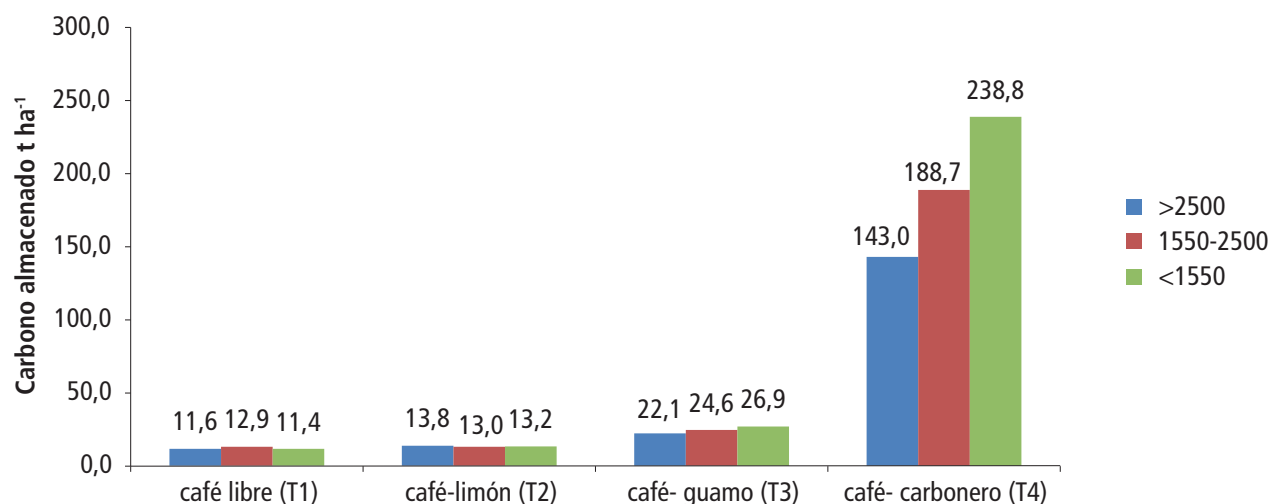


FIGURA 1. Carbono almacenado t ha⁻¹ en plantas de café y árboles de sombra evaluados en tres rangos altitudinales.

Jurado et al., (2019) estimaron al igual que esta investigación, la mayor captura de carbono en el sistema productivo de café y carbonero sembrado a una distancia de 12x12 con un valor promedio de 10,77 t ha⁻¹ en el municipio de Consacá, departamento de Nariño. Mientras que, López (2014), reportó el valor más alto de carbono en sistemas con alta densidad y árboles de sombrío, donde la vegetación arbórea aporta 8.86 t ha⁻¹ y las plantaciones de café 2.59 t ha⁻¹, sumando un total de 11.45 t ha⁻¹.

Los resultados obtenidos en esta investigación concuerdan con lo obtenido por Patiño et al., (2018), quienes concluyen que las plantaciones forestales y los sistemas agroforestales capturan grandes cantidades de C atmosférico. De igual forma se ha mostrado que las reservas de carbono son de mayor cantidad en las plantaciones de café con sombra a comparación a las que se encuentran a libre exposición o con baja presencia de sombra (Kim et al., 2016). Lo anterior indica que los sistemas de producción de café podrían llegar a convertirse en proyectos de pago por servicios ambientales, generando ingresos extras a los caficultores y contribuyendo a mitigar el cambio climático (Hernández et al., 2018).

Hojarasca. En el componente hojarasca se determinó un rango de fijación de carbono entre 0,17 y 0,42 t ha⁻¹, encontrándose el mejor resultado en el sistema (T3) con un valor promedio de 0,38 t ha⁻¹, siendo el más bajo almacenamiento de carbono el sistema (T1) con valor promedio de 0,18 t ha⁻¹ como se observa en la figura 2.

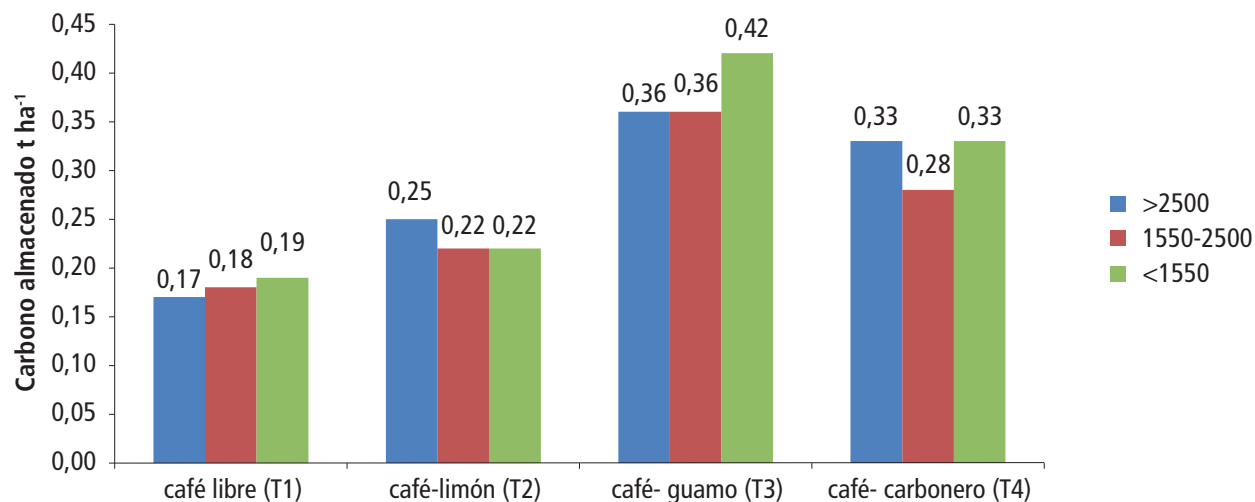


FIGURA 2. Carbono almacenado t ha⁻¹ de hojarasca en los sistemas productivos evaluados en tres pisos altitudinales.

Cabrera et al., (2016) reportaron una concentración promedio de 0.93 t ha⁻¹ en 32 sistemas agroforestales cafetaleros con sombra diversificada, valor que se encuentra por encima de lo encontrado en esta investigación; un bajo almacenamiento de carbono en hojarasca puede estar relacionado con las condiciones topográficas, climáticas y altitudinales como también con la densidad de siembra, tipo de árboles establecidos y capacidad de descomposición de materia orgánica (Hergoulach et al., 2012). Sin embargo, el carbono de las hojas al descomponerse, se convierte en parte del suelo, en dióxido de carbono que regresa a la atmósfera y en materia orgánica. En ese orden el 58% de su peso seco de materia orgánica es carbono, y representa otra oportunidad de secuestro a largo plazo (Toensmeier, 2015).

La baja acumulación de hojarasca en el sistema (T1) pudo deberse a una descomposición más rápida de esta, teniendo en cuenta la exposición directa del suelo al sol. De acuerdo con Bonilla et al., (2020) las altas temperaturas que alcanza la superficie del suelo, al estar a exposición directa del sol combinada con la humedad característica de las zonas productivas de café, producen una mayor descomposición de la materia orgánica. De igual forma Valenzuela y Visconti (2018), quienes afirman que el índice de humificación es significativamente mayor en el clima cálido, indistintamente del uso y la profundidad, tiene mayor capacidad de descomponer, mineralizar y humificar la materia orgánica, lo cual representa una importante capacidad de ser sumideros de CO.

Almacenamiento total de carbono aéreo. El sistema (T4) obtuvo el mayor valor de carbono total almacenado en biomasa aérea con un valor promedio de 190,42 t ha⁻¹, y el más bajo almacenamiento de carbono se observó en el sistema (T1) con un valor promedio de 12,12 t ha⁻¹ como se observa en la Tabla III, de manera general se determinó un rango de fijación de carbono de 11,57 a 239 t ha⁻¹; estos resultados no difieren con lo encontrado por Andrade y Segura (2012), en sus investigaciones relacionadas con sistemas de producción de café; donde demostraron que la tasa de fijación de carbono en la biomasa aérea total varía entre 13,12 y 245,6 t ha⁻¹.

TABLA III. Carbono total almacenado t ha⁻¹ en biomasa aérea en los sistemas productivos evaluados en tres pisos altitudinales. CCA = carbono café y arboles; CH= carbono hojarasca; CB= carbono de biomasa.

Rango	Tratamientos											
	café libre (T1)			café-limón (T2)			café- guamo (T3)			café- carbonero (T4)		
	CCA	CH	CB	CCA	CH	CB	CCA	CH	CB	CCA	CH	CB
>2000	11,6	0,17	11,77	13,75	0,25	14	22,14	0,36	22,5	143,02	0,33	143,35
1550-2000	12,92	0,18	13,1	13,01	0,22	13,23	24,56	0,36	24,92	188,68	0,28	188,96
<1550	11,42	0,19	11,61	13,19	0,22	13,41	26,87	0,42	27,29	238,8	0,33	239,13
Promedio	11,98	0,18	12,16 ^B	13,31	0,23	13,54 ^B	24,52	0,38	24,90 ^B	190,17	0,3	190,48 ^A

Diferencias estadísticas significativas p= 0,002. Letras similares (B) no presentan diferencias estadísticamente significativas.

Hay diferencias estadísticas significativas en los cuatro tratamientos evaluados, siendo el sistema (T4) el de mayor promedio obtenido con un almacenamiento de carbono de 190,42 t ha⁻¹ como se observa en la Tabla III. Estos resultados concuerdan con lo reportado por Vásquez *et al.*, (2012), quienes obtuvieron mayores promedios de acumulación de carbono en un sistema de *Inga jinicuil* con café (157.6 Mg ha⁻¹), que en café a libre exposición. De igual manera, Criollo *et al.*, (2020) proyectan para la especie *Albizia carbonaria* una captura de carbono de 143,73 Mg ha⁻¹ y teniendo en cuenta que el 84,22% de su masa total aérea es carbono. Acorde con lo anterior, las reservas de carbono son mayores en los sistemas productivos de café con sombra que en plantaciones de café a libre exposición o con poca sombra (López, 2014).

El sistema (T2) es el segundo en presentar los valores más altos en captura de carbono con un promedio de 24,46 t ha⁻¹; resultados semejantes a los reportados por Carvajal *et al.*, (2009), donde el valor promedio de carbono aéreo asimilado en árboles de limonero es de 22,3 t ha⁻¹. Siendo un factor relevante el desarrollo vegetativo que alcanza el limonero a lo largo de su vida, convirtiéndose en árboles más frondosos, con mayor superficie foliar y, por lo tanto, con mayor capacidad de captación de carbono.

El sistema (T3) presentó 22,49 t ha⁻¹ de carbono almacenado. Al considerar que en el sistema se encuentran establecidas tres especies, estos resultados están por debajo de lo reportado por Odar, (2018), quien afirma que árboles

como el Guamo, captura hasta $19,7 \text{ t ha}^{-1}$ de carbono en policultivos de poca sombra; y de lo reportado por Vásquez et al., (2012), quienes concluyen que el carbono constituye aproximadamente 40.8 % de la biomasa leñosa de *Inga jinicuil*, la cual se estimó que almacena $64.3 \text{ Mg C ha}^{-1}$.

El carbono almacenado en el sistema (T1) presenta un promedio de $12,12 \text{ t ha}^{-1}$ siendo este un resultado bajo con relación a lo obtenido en los otros tratamientos evaluados en esta investigación. Lo anterior no difiere con lo reportado por Odar (2018) y Cabrera et al., (2016), quienes obtuvieron valores promedio entre $10,3$ y $12,81 \text{ t ha}^{-1}$, respectivamente. Y se encuentra por encima de lo obtenido por Díaz et al., (2016), donde el uso de tierra a libre exposición con cafeto obtuvo promedios de $2,35 \text{ t C ha}^{-1}$.

Carbono almacenado en biomasa bajo el suelo

Raíces. La mayor cantidad de carbono almacenado en el componente raíz se obtuvo en el sistema (T4) con un valor de $21,45 \text{ t ha}^{-1}$; y el sistema que presentó menor almacenamiento de carbono fue (T1) con un valor de $3,43 \text{ t ha}^{-1}$ como se observa en la figura 3; 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; en el caso del sistema (T4) 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 (Stokes et al., 2008; Katayama et al., 2009; De Carvalho et al., 2016).

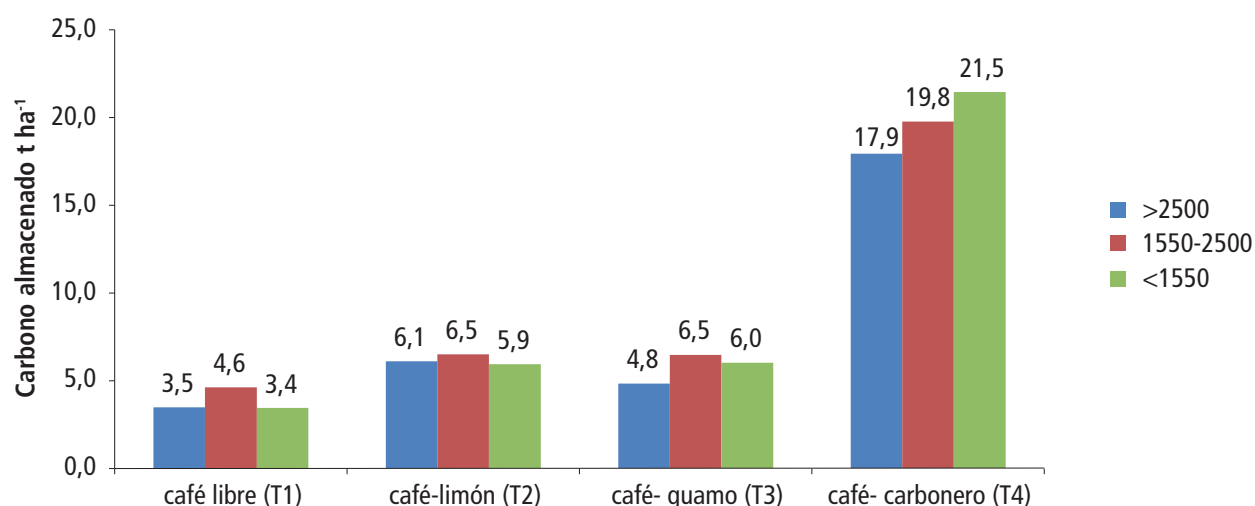


FIGURA 3. Carbono almacenado t ha^{-1} en el componente raíz de los sistemas productivos evaluados en tres pisos altitudinales.

Suelo. La mayor cantidad de carbono en el suelo se obtuvo a una altitud de 2058 msnm en el sistema (T4) con un valor de $109,22 \text{ t ha}^{-1}$; mientras tanto el sistema que presentó menor almacenamiento fue (T1) con un valor de

53,44 t ha⁻¹ a una altitud de 1528 msnm (Figura 4). Los resultados sugieren que en sistemas agroforestales de café con leñosas perennes leguminosas tienen mayores reservas de carbono en el suelo que el monocultivo de café (Hergoualch et al., 2012; Balaba & Byakagaba, 2015); los resultados también pueden deberse a la influencia que tiene el componente arbóreo al reducir la temperatura del suelo, mejorar la actividad microbiana y promover una mayor estabilidad del flujo del carbono, es decir, el carbono permanece almacenado en el suelo mucho más tiempo que en un sistema de café a libre exposición (Peng et al., 2009; De Carvalho et al., 2016).

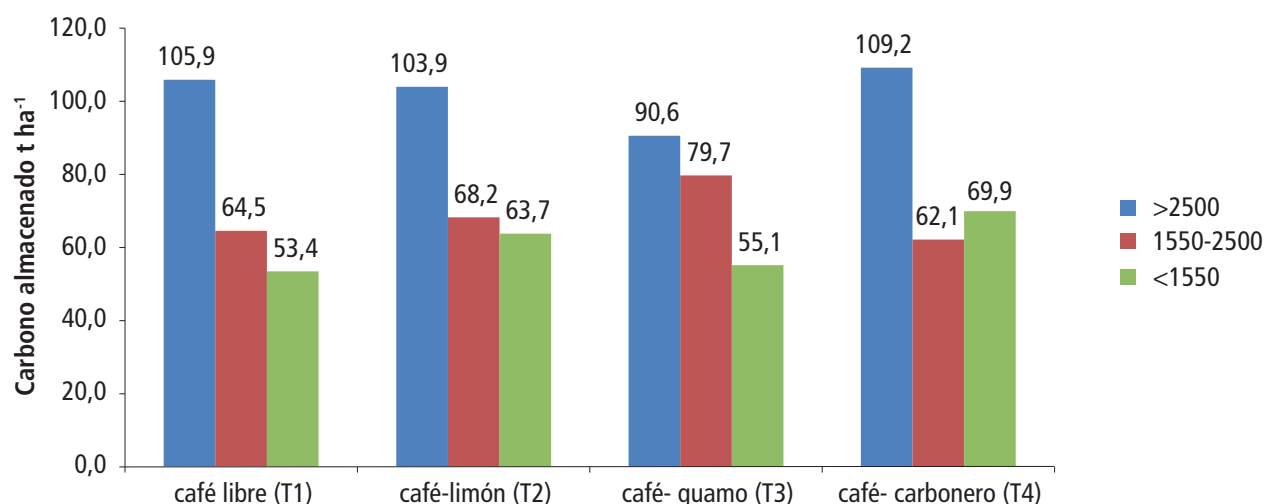


FIGURA 4. Carbono almacenado t ha⁻¹ en el componente suelo de los sistemas productivos evaluados en tres pisos altitudinales.

Almacenamiento total de carbono bajo el suelo. El carbono total almacenado en la biomasa del suelo se presentó en mayor proporción en el sistema (T4) con un valor de 127,15 t ha⁻¹ a una altitud de 2058 msnm; contrario al sistema T1 que presentó la menor concentración con 56,87 t ha⁻¹ a una altitud de 1528 msnm (Figura 5). Estos resultados demuestran que el almacenamiento de carbono, presentó valores más altos en sistemas con árboles, atribuible a las hojas, follaje y raíces muertas provenientes de los árboles de sombra y el café que incorporan materia orgánica al suelo (Thomazini et al., 2015).

En sistemas diversificados como (T4) el movimiento o desarreglo generado por la preparación del suelo, favorece el metabolismo del carbono, porque lo expone a la acción de los microorganismos edáficos con la congruente emisión de CO₂, que puede crecer si, además, se establecen especies vegetales que aportan residuos de fácil descomposición (Caviglia et al., 2016).

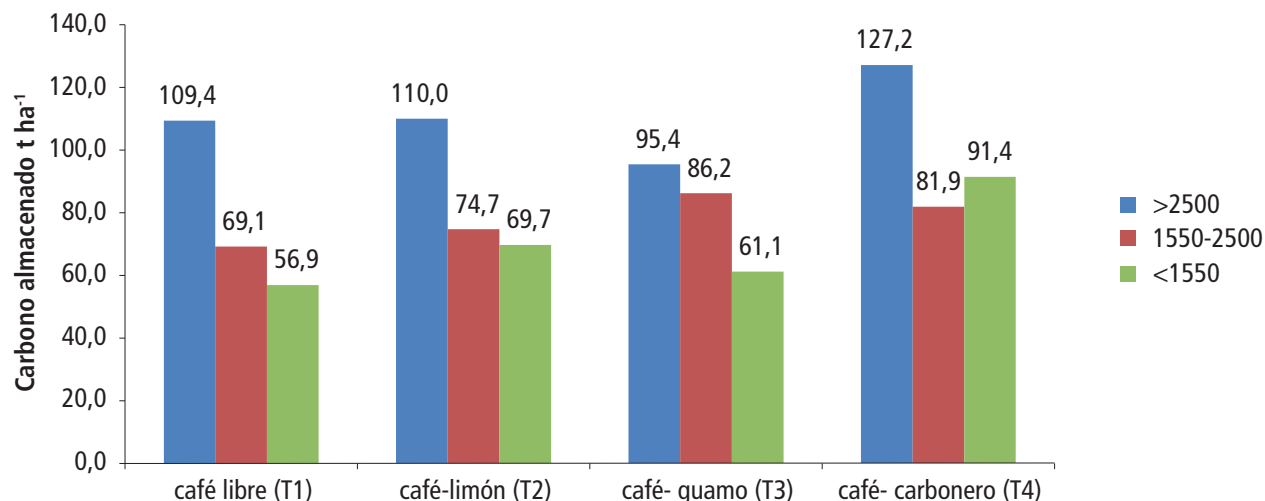


FIGURA 5. Carbono almacenado $t\ ha^{-1}$ en biomasa bajo el suelo de los sistemas productivos evaluados en tres pisos altitudinales.

Carbono total almacenado en biomasa aérea y bajo el suelo. Se presentaron diferencias estadísticas significativas ($P= 0,0001$) en el tratamiento (T4) en cantidades que varían desde 270,45 a 330,38 $t\ ha^{-1}$ (Figura 6), datos semejantes a lo reportado por Espinoza et al., (2012), donde el carbono almacenado en un sistema agroforestal con café se encuentra en rangos desde 254,36 a 345,2 $t\ ha^{-1}$. El sistema que presentó menor almacenamiento de carbono fue (T1) con valores de 68,44 a 121,07 $t\ ha^{-1}$ (Figura 6); esta diferencia puede estar relacionada con la baja presencia de hojarasca en el suelo, ya que, solo se presenta una especie que aporte este material dentro del sistema (Castro, 2017).

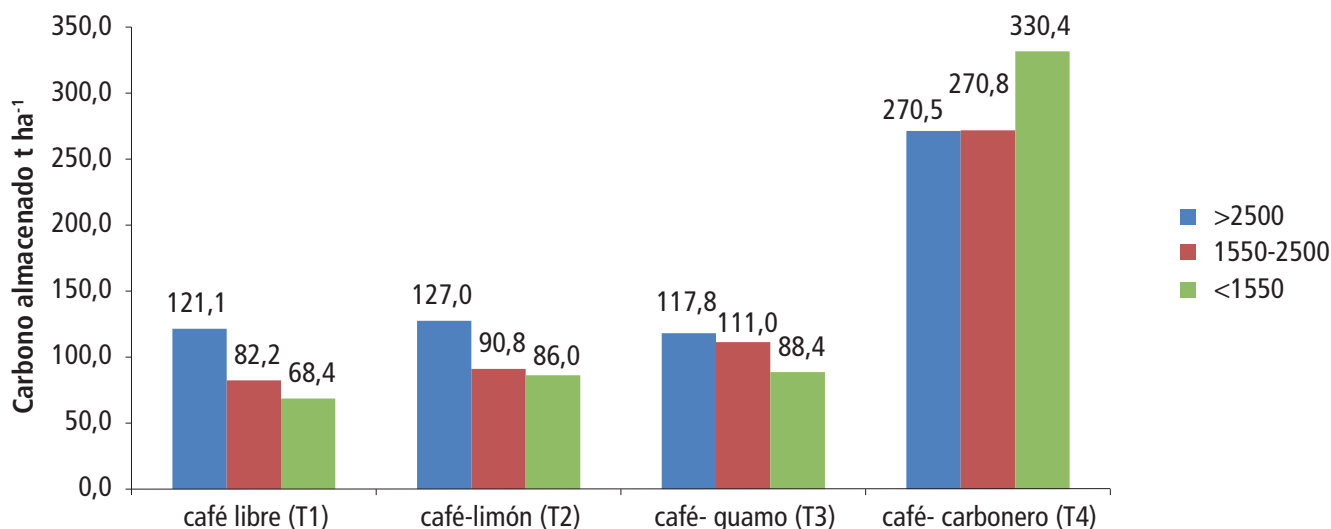


FIGURA 6. Carbono almacenado en $t\ ha^{-1}$ en biomasa aérea y bajo el suelo en los sistemas productivos evaluados en tres pisos altitudinales.

La mayor tasa de carbono almacenado se produjo en el sistema T4 que incluye árboles de gran dosel, estos pueden retener carbono en su madera por un tiempo prolongado; la captura de carbono en los árboles, se debe al manejo silvicultural que se le proporcione a cada individuo, permitiendo el desarrollo de tallos con grandes dimensiones, como el caso de la especie carbonero establecida en el sistema (T4); de igual manera se ha encontrado que árboles con grandes dimensiones tanto en altura como en diámetro, el almacenaje de carbono es mayor que aquellos que son más pequeños (Ávila et al., 2001; Ibrahim et al., 2006; Gómez y Oviedo, 2000).

CONCLUSIONES

El almacenamiento de carbono en biomasa aérea y suelo, fue mayor, en los sistemas productivos de café con árboles de sombrío a una altitud de 2058 msnm.

La mayor tasa de carbono almacenado se produjo en los SAF-café, donde la implementación de la especie carbonero y guamo (T4) obtuvo diferencias estadísticas significativas, superando el resultado en todos los componentes evaluados tanto en biomasa aérea como suelo, demostrando que las reservas de carbono son mayores en los sistemas productivos de café con sombra que en plantaciones de café a libre exposición.

Los resultados indican la importancia ambiental de los SAF-café en la mitigación del cambio climático, puesto que sistemas productivos con mayor diversidad de especies almacenan mayor cantidad de carbono total, debido a que presentan mayor presencia de biomasa viva, a diferencia de los sistemas de café establecidos en monocultivo a libre exposición.

Agradecimientos

En memoria del ingeniero Juan Pablo Matabanchoy Cañar. Los autores agradecen al Grupo de Investigación en Producción de Frutales Andinos de la Universidad de Nariño y al proyecto “Investigación evaluación del efecto de sombra de diferentes especies arbóreas en el comportamiento agronómico y calidad de Café, Consacá, Nariño, Occidente” financiado por el SGR.

REFERENCIAS

Álvarez, E., Saldarriaga, J., Duque, A., Cabrera, K., Yepes, A., Navarrete, D. y 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.

- Andrade, H. y Segura, M. (2012). Huella de carbono en cadenas productivas de café (*Coffea arabica* L.) con diferentes estándares de certificación en costa rica. Rev. Luna Azul. 35 (1): 60-77
- Ávila, G., F. Jiménez, J. Beer, M. Gómez y M. Ibrahim. (2001). Almacenamiento, fijación de carbono y valoración de servicios ambientales en sistemas agroforestales. Rev. Agroforestería en las Américas 8(30): 32-35.
- Balaba, S. y Byakagaba, P. (2015). Soil organic carbon stocks under coffee agroforestry systems and coffee monoculture in Uganda. Agriculture, Ecosystems and Environment. 216: 188–193.
- Bonilla, C., Díaz, J., Girin, K., León, M., Ortiz, O. y Suarez, A. (2020). Dinámica de la descomposición de residuos orgánicos. Suelos Ecuatoriales, 50(1y2), 31-39. [https://doi.org/10.47864/SE\(50\)2020p31-39_123](https://doi.org/10.47864/SE(50)2020p31-39_123)
- Cabrera, M., Vaca, S., Aguirre, F. y Aguirre, H. (2016). Almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales cafetaleros en las provincias de Jaén y San Ignacio, Cajamarca. Rev. Pakamuros 4 (1): 43-54.
- Carvajal, M., Mota, C., Alcaraz, C., Iglesias, M. y Martínez, B. (2009). Investigación sobre la absorción de CO₂ por los cultivos más representativos de la región de Murcia. Recuperada de http://cambioclimaticomurcia.carm.es/pdfs/lessco2/ponencia_cisc_espanol.pdf
- Castellanos, E., Quilo, A. y Mato, R. (2010). Metodología para la Estimación del contenido de carbono en bosques y sistemas agroforestales en Guatemala. Recuperada de http://www.uvg.edu.gt/investigacion/ceab/cea/doc/metodologias/Metodolog%C3%ADa_Estimaci%C3%B3n%20de%20Carbono-esp%C3%B3l_CEAB-UVG%202010.pdf
- Castro, R. (2017). Almacenamiento de carbono y análisis de Rentabilidad en sistemas agroforestales con *Coffea arabica* (L) En la zona de los Santos, Costa Rica. Recuperado de: https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/9395/almacenamiento_carbono_analisis_rentabilidad_sistemas.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Caviglia, P., Wingeyer, B. y Novelli, E. (2016). El rol de los suelos agrícolas frente al cambio climático. Serie de Extensión INTA Paraná. 78 (1):27-32.
- CORPONARIÑO. (2008). Diagnostico biofísico y socioeconómico municipio de Sandoná. Recuperado de: <https://corponarino.gov.co/expedientes/intervencion/DIAGNOSTICO%20BIOFISICO%20SOCIO%20ECONOMICA%20DE%20SANDONA.pdf>.
- Criollo, H., Muñoz, J. y Lagos, T. 2020. Modelos alométricos para biomasa y carbono de *Albizia carbonaria* durante la fase de crecimiento vegetativo. Rev. Ciencia y Agricultura. 16 p. doi: <https://doi.org/10.19053/01228420.v17.n3.2020.11384>
- Díaz, P., Ruiz, G., Tello, C. y Arévalo, L. (2016). Carbono almacenado en cinco sistemas de uso de tierra, en la región San Martín Perú. Revista internacional de desarrollo regional sustentable. Vol. 1(2). 11 p.
- De Beenhouwer, M.; Geeraert, L.; Mertens, J.; Maarten, Van.; Aerts, R.; Vanderhaegen, K. y Honnay, O. (2016). Biodiversity and carbon storage co-benefits of coffee agroforestry across a gradient of increasing management intensity in the SW Ethiopian highlands. Agriculture, Ecosystems & Environment, Vol. 222. 193-199 pág.

- De Carvalho, L., Cardoso, M., De Sá Mendonça, E., Fernandes, A., Lopes, S. y 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>
- Espinoza, W., Vázquez, A. y Torres, A. (2012). Almacén de carbono en sistemas agroforestales con café. 18 (1): 57-70. DOI: 10.5154/r.rchscfa.2011.04.030 <http://www.chapingo.mx./revistas> .
- FAO – Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. 2016. El estado de los bosques del mundo 2016. Los bosques y la agricultura: desafíos y oportunidades en relación con el uso de la tierra. Roma. 137 p.
- Farfán, F. (2012). Árboles con potencial para ser incorporados en sistemas agroforestales con café. Chinchiná (Colombia): Centro Nacional de Investigaciones de Café – Cenicafe. 88 p
- Gómez, V y 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.
- Hergoulach, K., Blancart, E., Skiba, U., Henault, C. y 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.
- Hernández, J., Riaño, N., Riaño, A., Camacho, W., Posada, H., Valenzuela, J., Vega, M., Murgueitio, Y. y Castro J. (2018). Determinación de la huella de carbono en el sistema de producción de café pergamino seco de cuatro municipios del sur del departamento del Huila (Colombia). 110-120. 134 p.
- Ibrahim, M., Mora, J. y Rosales, M. (2006). Potencialidades de los sistemas silvopastoriles para la generación de servicios ambientales. CATIE. Turrialba, Costa 10 p.
- Isaza, C. (2014). Análisis de oportunidades para la gestión eficiente del carbono en un sistema de producción de café en el departamento de Caldas. Recuperada de <http://ridum.umanizales.edu.co:8080/xmlui/handle/6789/1837>
- Jurado, M., Ordoñez, H., Ballesteros, W. y Delgado, I. (2019). Evaluación de captura de carbono en sistemas productivos de café (*Coffea arabica* L.), Consacá, Nariño – Colombia. Universidad de Nariño. Facultad de Ciencias Agrícolas, Pasto, Nariño.
- Katayama, A., Kume, T., Komatsu, H., Ohashi, M., Nakagawa, M., Yamashita, M., Otsuki, K., Suzuki, M. y 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. y 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*, 4789–4809.
- 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.

- Matta, Y. 2017. Exportaciones de Colombia. Expresiones, Revista Estudiantil de Investigación. ISSN 2619-452X. Vol 4, No 8. 74 p.
- Montagnini, F., Somarriba, E., Murgueitio, E., Fassola, H., y Eibl, B. 2015. Sistemas Agroforestales. Funciones Productivas, Socioeconómicas y Ambientales. Serie técnica. Informe técnico 402. CATIE, Turrialba, Costa Rica. Editorial CIPAV, Cali, Colombia. 454p.
- Motta-Delgado PA., Ocaña-Martínez HE.(2018) Caracterización de subsistemas de pasturas braquiarias en hatos de trópico húmedo, Caquetá, Colombia. *Ciencia y Agricultura*, 15(1): 81-92. doi: <https://doi.org/10.19053/01228420.v15.n1.2018.7759>
- Odor, 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.
- Patiño, S., Suárez, L., Andrade, H. y Segura, M. (2018). Captura de carbono en biomasa en plantaciones forestales y sistemas agroforestales en Armero-Guayabal, Tolima, Colombia. Revista de investigación agraria y ambiental. 121-134.
- Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). (2003). Good practice guidance for land use, land-use change and forestry. Japan: Institute for Global Environmental Strategies (IGES). 90 p.
- Peng, S., Piao, S., Wang, T., Sun, J. y Shen, Z. (2009). Temperature sensitivity of soil respiration in different ecosystems in china. *Soil Biology and Biochemistry*. 41(5):1008-1014
- Quilio, A., Castellanos, E. y Pons, D. (2010). Estudio de línea base de carbono en cafetales. Guatemala, UVG. 48 p.
- Ramachandran, N. y 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. y Porro, R. (2009) Guía para la Determinación de Carbono en Pequeñas Propiedades Rurales. Centro Mundial Agroforestal (ICRAF). Consorcio Iniciativa Amazônica (IA) 1. Ed. Lima, Perú. 79 p.
- Segura, M. y 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. y Fourcaud, T. (2008) How Vegetation Reinforces Soil on Slopes. En: *Slope Stability and Erosion Control. Rev. Ecotechnological Solutions* 65–118
- Thomazini, A., Mendonça, E., Teixeira, D., Almeida, I., La Scala, N., Canellas, L. y Schaefer, C. (2015). CO₂ and N₂O emissions in a soil chronosequence at a glacier retreat zone in Maritime Antarctica. *Sci. Total Environ.* 521: 336–345.
- Toensmeier, E. (2015). Prácticas agrícolas que secuestran carbono: fortaleciendo los suelos y estabilizando el clima. *ECHO development Notes*. 11 p.
- Valenzuela, I. y Visconti, E. (2018). Influencia del clima, uso del suelo y profundidad sobre el contenido de carbono orgánico en dos pisos altitudinales andinos del departamento Norte de Santander, Colombia. *Revista Colombiana De Ciencias Hortícolas*, 12(1), 233-243. <https://doi.org/10.17584/rcch.2018v12i1.7349>

- Vásquez, E., Campos, G., Enríquez, J., Rodríguez, G. y Velasco V. (2012). Captura de carbono por *Inga jinicuil* Schltdl: En un sistema agroforestal de café bajo sombra. Revista mexicana de ciencias forestales, 3(9), 11-21.
- Walkley, A. y Black, A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Science, 37: 29-38.