

RECURSOS NATURALES Y AMBIENTE

Carbono almacenado en sistemas agroforestales con café (*Coffea arabica* L.) en tres municipios de Boaco, Nicaragua

Carbon stored in agroforestry systems with coffee (*Coffea arabica* L.) in three municipalities of Boaco, Nicaragua

Edwin Freddy Ortega Tórrez¹, Rodolfo de Jesús Munguía Hernández², Jorge Ulises Blandón Díaz³

¹ MSc. Agroecología y desarrollo sostenible, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3848-1642/edwin.ortega@ci.una.edu.ni>/Sede Universitaria UNA-Camoapa

² MSc. Agricultura tropical con énfasis en agroecología, Facultad de Agronomía, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1091-3415/rodolfom@ci.una.edu.ni>

³ PhD. Fitopatología, Facultad de Agronomía, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7904-8853/ulisesbd@ci.una.edu.ni>
Universidad Nacional Agraria, Managua, Nicaragua



RESUMEN

La mayor parte de la producción de café en Nicaragua se cultiva bajo sombra, esto permite la captura de importantes volúmenes de carbono procedente de la atmósfera que, bajo el concepto de pago por servicios ambientales, significaría generación de otros ingresos para el productor. El objetivo fue calcular los volúmenes de carbono almacenado por árboles, arbustos de café, mantillo y suelo en el sistema agroforestal con café y estimar su valoración económica. La investigación fue no experimental bajo un proceso metodológico de tres fases: planificación, ejecución e interpretación de resultados; la muestra se seleccionó en base a criterios definidos por la Unión de Cooperativas, entre ellos: productor líder en su comunidad, piso altitudinal entre 600 y 900 metros sobre el nivel del mar, productor abierto a la comunicación y que aplicara las capacitaciones que les imparte la Cooperativa. La muestra estuvo compuesta de dos sistemas agroforestales cercanos a los 900 msnm y dos cercanos a los 600 msnm. Se utilizó una parcela única de muestreo de 0.25 ha a cuyos árboles y arbustos muestreados se aplicó ecuaciones alométricas, el mantillo se sometió a descuento de humedad, de ellos se obtuvo materia seca y se aplicó el factor carbono de 0.5. Para el suelo se determinó densidad aparente (g cm^{-3}) y carbono orgánico (%) para ser utilizados en la fórmula de Andrade e Ibrahim, 2003. El componente suelo fue el que presentó mayor volumen promedio de carbono almacenado con $80.86 \text{ t C ha}^{-1}$ seguido por árboles, mantillo y arbustos de café con 15.58 , 6.21 y 1.22 t C ha^{-1} respectivamente. Los sistemas agroforestales con mayor y menor volumen de carbono almacenado fueron Los Chilamates y Las Quebradas con 119.22 y $89.01 \text{ t C ha}^{-1}$. Con base al

ABSTRACT

Most of the coffee production in Nicaragua is grown under shade, which allows the capture of significant volumes of carbon from the atmosphere that, under the concept of payment for environmental services, would mean the generation of other income for the producer. The objective was to calculate the volumes of carbon stored by trees, coffee bushes, mulch and soil in the agroforestry system with coffee and estimate its economic value. The research was non-experimental under a methodological process of three phases: planning, execution and analysis and interpretation of results; The sample was selected based on criteria defined by the Union of Cooperatives, among them: leading producer in his community, altitudinal floor between 600 and 900 m, producer open to communication and who applied the training provided by the Cooperative, the sample It was composed of two agroforestry systems close to 900 masl and two close to 600 masl. A single sampling plot of 0.25 ha was used to whose sampled trees and shrubs allometric equations were applied, the mulch was subjected to moisture discount, dry matter was obtained from them and the carbon factor of 0.5 was applied. For the soil, apparent density (g cm^{-3}) and organic carbon (%) were determined to be used in the formula of Andrade and Ibrahim, 2003. The soil component was the one that presented the highest average volume of stored carbon with $80.86 \text{ t C ha}^{-1}$ followed by trees, mulch and coffee bushes with 15.58 , 6.21 and 1.22 t C ha^{-1} respectively. The agroforestry systems with the highest and lowest volume of carbon stored were Los Chilamates and Las Quebradas with 119.22 and $89.01 \text{ t C ha}^{-1}$. Based on the carbon stored, producers could receive other income

Recibido: 8 de octubre del 2022
Aceptado: 26 de mayo del 2023



© Copyright 2023. Universidad Nacional Agraria (UNA).

Los artículos de la revista La Calera de la Universidad Nacional Agraria, Nicaragua, se comparten bajo términos de la licencia Creative Commons: Reconocimiento, No Comercial, Compartir Igual. Las autorizaciones adicionales a las aquí delimitadas se pueden obtener en el correo donald.juarez@ci.una.edu.ni

RECURSOS NATURALES Y AMBIENTE

carbono almacenado los productores podrían percibir otros ingresos por captura de carbono de 874.36 a 652.80 dólares americanos por hectárea en base al CO₂ almacenado. Se recomienda realizar el estudio a mayor número de productores y contar con información base relevante para gestionar proyecto de pago por almacenaje de carbono.

Palabras clave: sistemas agroforestales, gas de efecto invernadero, caficultura, agroecología.

En Nicaragua la producción de café aporta aproximadamente 4 % del PIB y genera cerca de 332 000 empleos directos e indirectos (Arguello y Olivero, 2015); además el Centro de trámites de las exportaciones (CETREX, 2020), confirma ingresos al país por exportación de café del ciclo 2019 - 2020 de USD 460.17 millones de dólares americanos.

Valkila (2009) plantea que del 4 % a 5 % de las exportaciones de café son certificados orgánicos con rendimientos cercanos a 300 kg ha⁻¹, rendimientos considerados bajos. Lo antes planteado es un factor que desmotiva al productor orgánico ya que este sistema de producción demanda de muchas condiciones para su certificación y su precio internacional no es visto como justo, es por tal razón que el productor busca otras formas de ingresos como venta de leña proveniente del manejo de tejido de los árboles y arbustos, así como utilizar árboles frutales dentro del sistema agroforestal para alimentación y comercio de frutas.

La producción de café orgánico se desarrolla bajo sombra utilizando diversidad de especies forestales y frutales con densidades variables según la decisión de manejo del productor. Para la Organización Internacional del Café (OIC, 2013, p. 15), el café bajo sombra proporciona una oferta ambiental con un impacto positivo en la producción de agua, biodiversidad, paisajismo y captura de carbono, quienes tienen un valor de mercado aún no aprovechados cuyos ingresos está dejando de percibir el productor y que podría contribuir a la sostenibilidad de los productores y sus familias.

Esta investigación se realizó en cuatro sistemas agroforestales con café con manejo orgánico, están ubicados en tres municipios del departamento de Boaco, Nicaragua, presentan árboles de especies diversas, lo que se denomina sombra mixta.

La cuantificación de carbono almacenado en este tipo de sistemas de producción permitirá ampliar el conocimiento sobre nuevas formas de generar otros ingresos económicos a través de pagos por servicios ambientales, en este caso por la captura de carbono en árboles, arbustos de café, mantillo (hojarasca) y suelo, que puede ser extensivo a los productores (764) de la cooperativa Tierra Nueva, así como a otros interesados.

from carbon capture from 874.36 to 652.80 US dollars per hectare based on stored CO₂. It is recommended to carry out the study with a greater number of producers and have relevant base information to manage the carbon storage payment project.

Keywords: Agroforestry systems, greenhouse gas, coffee farming, agroecology.

El objetivo de este estudio es calcular el carbono almacenado en el suelo, árboles, mantillo y arbustos de café dentro del sistema agroforestal (SAF), así como su cuantificación económica.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación, descripción del área de estudio y tipo de investigación. El estudio se realizó en tres de los seis municipios que conforman el departamento de Boaco. Se trabajó con cuatro sistemas agroforestales con café bajo manejo orgánico con 4.22 a 2.81 ha bajo densidades entre 60 a 416 árboles por hectárea de especies diversas, lo que se denomina sombra mixta. Según Espinoza (comunicación personal, 15 de mayo, 2011) los cuatro SAF pertenecen a la Unión de Cooperativas Tierra Nueva, en el departamento de Boaco, Nicaragua, institución conformada por 674 productores con 853 ha, rendimientos promedio de 590 kg ha⁻¹ y una producción estimada en 503.27 toneladas de café oro por ciclo productivo.

En el municipio de Boaco, comarca San Buena Ventura, se localiza el SAF del productor Juan Mora, finca Santa Gertrudis ubicada en las coordenadas 12°32'45.41" de latitud Norte y 85°38'20.93" de longitud Oeste, a una altitud de 554 m.s.n.m y una pendiente del terreno de 29.04 %, en el municipio de San José de los Remates, comarca El Bejuco se localiza el SAF Los Laureles, propiedad del productor Elías Rivas Sequeira ubicada en las coordenadas 12°36'14.26" de latitud Norte 85°38'60" de longitud Oeste a 601 m.s.n.m. y una pendiente del terreno de 45.3 % El tercer SAF denominado finca Los Chilamates, propiedad del productor Pascual Espinoza, se ubica en el municipio de Santa Lucía, comarca Las Mercedes en las coordenadas 12°34'26.86" de latitud Norte y 85°40'31.64" de longitud Oeste a una altitud de 890 m.s.n.m y una pendiente del terreno de 26.8 % y por último el SAF del productor Remigio Espinoza, finca Las Quebradas, se encuentra en las coordenadas 12°34'25.01" de latitud Norte y 85°40'32.61" de longitud Oeste a 880 m.s.n.m. y una pendiente del terreno de 31.96 %.

Buitrago (2005) afirma que "San José de los Remates y Santa Lucía son parajes montañosos, frescos con suelos inceptisoles, pH ligero ácido, con profundidad media, drenaje regular y relieve ondulado, desarrollados por cenizas volcánicas y aptos para el cultivo del café" (p. 11). Por su parte Incer (2000) plantea que "la cordillera chontaleña

RECURSOS NATURALES Y AMBIENTE

formada por un grupo montañoso es rodeada por Muy Muy, Esquipulas, San José de los Remates, Santa Lucía y Boaco en cuyas áreas se cultiva café de sol y de sombra” (p. 249). Boaco se ubica a una altitud de 355 m.s.n.m., presenta temperatura media histórica (1982 – 2012) de 24.5 °C y precipitación media por año de 1 334 mm (Climate-data.org, s.f.).

La investigación fue no experimental por lo cual se diseñó un proceso metodológico estructurado en tres fases. Se implementó en el período de enero a noviembre del 2011.

Fase de planificación. Se desarrolló entre los meses de enero y febrero en tres momentos: primero se trabajó en la coordinación con la Cooperativa Tierra Nueva quienes asignaron un técnico que fungió de enlace entre el investigador, la Cooperativa y los productores. Posteriormente fue la visita de acercamiento a productores para verificar su disposición hacia la investigación y planificar las próximas visitas. Por último, fue la validación y pilotaje de instrumentos de recolección de información donde se validó y piloteó los formatos de recolección de información y equipos que se utilizaron en el estudio (cinta métrica, pesa digital, GPS, altímetro HAGA, cinta diamétrica, marco cuadrado y cilindro para muestra de suelo).

Fase de ejecución. Desarrollada de marzo a noviembre por medio de tres visitas a los SAF: El 1 de marzo se realizó muestreo de suelo, el 3 de mayo muestreo de mantillo, altura y diámetro del tronco de café y el 28 de noviembre se realizó un inventario, y registro de altura total y diámetro a la altura del pecho (DAP) de las especies arbóreas.

Fase de análisis e interpretación de resultados. Se desarrolló en tres etapas: etapa de sistematización y ordenamiento de la información utilizando Microsoft Word y Microsoft Excel, con el objetivo de facilitar los cálculos correspondientes. Etapa de interpretación de resultados donde se ordenaron los datos según los objetivos, se realizó revisión documental para relacionar los resultados con las conclusiones de otros estudios y por último la etapa de conclusiones y recomendaciones, sobre la base de la interpretación y análisis de los resultados en correspondencia con los objetivos.

Variables evaluadas

Carbono almacenado por árboles (t C ha⁻¹). En cada parcela temporal de 0.25 ha Se realizó inventario de las especies arbóreas con diámetro a la altura del pecho mayor o igual a cinco centímetros, a los que se les midió altura en metros y DAP en centímetros; estos datos se utilizaron en la ecuación alométrica para calcular carbono de árboles en cafetal según la propuesta de Suárez *et al.* (2004, p. 115) y obtener kilogramos de mantillo seco, la que se multiplicó por factor carbono de 0.5. Posteriormente este resultado se

multiplicó por cuatro y dividió entre mil para transformarlos a toneladas por hectárea de carbono almacenado.

Ecuación alométrica con un $R^2_{adj} = 0.94$ para árboles menores o iguales a 50 cm de DAP.

$$\log 10B = -0.9578 + 2.3408 * \log 10 (D)$$

Donde:

B= Biomasa aérea total (kg planta⁻¹)

D= Diámetro del tronco a 1.30 m del suelo

Además se determinó carbono almacenado por familia taxonómica a partir del inventario arbóreo

Carbono almacenado por arbustos de café (t C ha⁻¹). Se utilizó una muestra aleatoria de cinco puntos representativos dentro de la parcela temporal (0.25 ha) con 10 arbustos por punto para un total de 50 arbustos. En cada punto se tomaron cinco arbustos de un surco y cinco arbustos del surco contiguo. Se midió altura de los arbustos de café en metros y diámetro del tronco en centímetros, específicamente a 15 cm arriba de la superficie del suelo.

Para encontrar biomasa seca se utilizó la fórmula propuesta por Suárez *et al.* (2004, p. 118) con un $R^2_{adj} = 0.95$, específicamente para arbustos de café; posteriormente el resultado se multiplicó por el factor carbono de 0.5 [Grupo Consultivo de Expertos (GCE, s.f., p. 42)] y por la densidad de arbustos por hectárea para obtener carbono almacenado:

$$\log 10B = -1.15 + 1.66 * \log 10 (D15) + 0.54 * \log 10 (h)$$

Donde:

B = Biomasa aérea total (kg planta⁻¹)

D15 = Diámetro del tronco a 15 cm del suelo

H = Altura (m) con un $R^2_{adj} = 0.95$

Carbono almacenado por el mantillo (t C ha⁻¹). Se utilizaron cinco puntos representativos de muestreo utilizando el marco cuadrado de 0.25 m² en cada parcela temporal; se colectó y pesó el mantillo presente en el suelo, el cual está compuesto por (las hojas arriba del suelo, ramas con diámetro menor a 2 cm de diámetro y el material fraccionado que es el material alterado por descomposición por la acción del ambiente y la fauna del suelo), la colecta de la fracción de residuos vegetales se hizo en la hilera y en la calle del cafetal, excluyendo ramas con un diámetro mayor a 2 cm.

Las cinco submuestras por fracción obtenida en mantillo, tanto de la hilera como de la calle, se mezclaron y homogenizaron para obtener una muestra compuesta de 500 gramos; éstas se empacaron en bolsas de papel Kraft y se

RECURSOS NATURALES Y AMBIENTE

trasladó al laboratorio de fisiología vegetal de la Universidad Nacional Agraria. (Managua) para su secado en un horno (mufla) a una temperatura de 65 °C por 72 horas hasta lograr un peso constante. De la muestra compuesta se tomó una porción de 100 g de peso seco para determinar los elementos N, P, K, Ca, Mg como minerales en el mantillo. La materia seca (ms) del mantillo (t ms ha⁻¹) se multiplicó por el factor de carbono 0.5 para obtener carbono almacenado en mantillo (GCE, s.f., p. 42).

Carbono almacenado en el suelo (t C ha⁻¹). En cada uno de los cinco puntos seleccionados al azar, se extrajo una submuestra de suelo de 500 gramos a una profundidad de 0.20 m, precisamente en el área de goteo del arbusto de café. Las cinco submuestras se mezclaron, homogenizaron y tamizaron para obtener una muestra compuesta de 1 kg de tierra por agroecosistema (adaptado de Centeno y Herrera 2005, p. 7).

Las muestras compuestas fueron introducidas en bolsas plásticas bien rotuladas con su fecha, tipo de cultivo, zona, código de la finca, propósito; y llevadas al laboratorio de suelos y agua de la Universidad Nacional Agraria en Managua para determinar porcentaje de carbono orgánico. En cada punto se extrajo una muestra de suelo a 0.1 m de profundidad, utilizando un cilindro de 10 cm de longitud y cinco centímetros de diámetro para calcular densidad aparente (g cm⁻³). Se utilizó la fórmula citada por Andrade e Ibrahim, (2003, p. 115) para calcular carbono almacenado en el suelo:

$$COS = Ps \times DA \times CO$$

Donde:

COS: Carbono orgánico del suelo

Ps: Profundidad del suelo de donde se obtuvo la muestra (cm)

CO: Carbono orgánico (%) obtenido en el análisis de suelo a partir de la materia orgánica

DA: Densidad aparente del suelo (g cm⁻³)

Contribución total de carbono almacenado en los SAF (t C ha⁻¹). Se realizó la sumatoria de los volúmenes de carbono que almacena cada uno de los componentes (árboles, arbustos de café, suelo y mantillo), que integran el sistema agroforestal con café, identificando el SAF con las mayores contribuciones de almacenamiento de carbono.

Pendiente del terreno de los SAF. Se determinó la pendiente en porcentaje de los cuatro SAF con ayuda del aparato A, estos datos se utilizaron en el análisis de componentes principales para relacionarlo con el almacenaje de carbono.

Selección del SAF. La muestra o SAF se obtuvo por conveniencia utilizando aquellas unidades disponibles a las cuales se tiene acceso (Sampieri, 2014, p. 390). Además, se usaron criterios definidos por la Unión de Cooperativas Tierra Nueva que debía cumplir el propietario del SAF: ser productor líder en su comunidad, abiertos a la comunicación, estar bajo dos pisos altitudinales y aplicar las capacitaciones que les imparte la cooperativa.

Parcela de muestreo. El área de los SAF osciló entre 4.22 ha y 2.81 ha. La definición de la parcela de muestreo se realizó según la propuesta del CATIE (2002, p. 203) quien propone “un nivel de precisión en cuanto al tamaño de parcela de cinco a 20 %”. Basado en este planteamiento, se utilizó una parcela temporal única de muestreo de forma cuadrada de 0.25 ha ubicada en el centro del sistema productivo, representando más del 5 % del tamaño del SAF.

Registro de información. Se recolectó en formatos diseñados según las condiciones y componentes de cada sistema agroforestal.

Análisis de datos. El análisis se hizo con estadísticas descriptiva, para ello se utilizó hojas de cálculo de Microsoft Excel para realizar los cálculos y elaborar los cuadros y las figuras, excepto la figura que presenta el análisis de componentes principales, para la que se utilizó el software RStudio Team [versión 4.0.5.] (R Core Team, 2021).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Carbono almacenado por árboles (t C ha⁻¹), número de árboles por hectárea y diámetro de árboles. En el Cuadro 1 se presenta la cantidad de carbono almacenado por árboles en los sistemas agroforestales, así como la cantidad de árboles por hectáreas y los valores de diámetros del árbol. El SAF Los Laureles fue el que más carbono almacenó y el SAF Santa Gertrudis es el que menos captación registra. Las variables densidad (número de árboles por hectárea) y diámetro de árbol, fueron determinantes en el carbono almacenado. En los cuatro SAF se determinaron 19 familias botánicas, siendo Fabaceae la que más carbono almacenó, seguido de la familia Mimosaceae y luego la familia Verbenaceae (Cuadro 2).

Cuadro 1. Carbono almacenado por árboles (t C ha⁻¹), densidad de árboles (árboles ha⁻¹) y diámetro de árbol (cm) según sistema agroforestal

Variables	Santa	Los	Los	Las
	Gertrudis	Laureles	Chilamates	Quebradas
Carbono almacenado en árboles (t C ha ⁻¹)	6.43	25.70	8.50	21.71
Densidad (árboles ha ⁻¹)	60.00	304.00	152.00	416.00
Diámetro de árboles (cm)	24.23	19.84	16.53	16.30

RECURSOS NATURALES Y AMBIENTE

Diversos autores relacionan las variables altura, diámetro, densidad, especie y edad de un árbol con su biomasa. Suárez (2002), sustenta en base a correlación, que el diámetro a la altura del pecho (DAP) explica de mejor manera la biomasa de los árboles comparada con la altura, justificando el uso en ecuaciones alométricas, y que la altura es influenciada por las prácticas de manejo presentando una menor correlación (p. 60).

Medina *et al.* (2009), consideran que la densidad de árboles por hectárea, edad y diámetro están ligados al carbono que almacenan, y registran densidades entre 552 y 155 árboles ha⁻¹ y diámetros entre 8 a 42 cm captando entre 4.5 t C ha⁻¹ y 15.23 t C ha⁻¹ (pp. 29 – 32), en cambio Pico (2011) reporta “valores de 29.42 t C ha⁻¹ almacenado con 355 árboles mayores a cinco centímetros de DAP” (p. 47).

Carbono almacenado en árboles según familia taxonómica (t C ha⁻¹). En el Cuadro 2 se presenta la cantidad de carbono almacenado por familia taxonómica en cada uno de los sistemas agroforestales. Las familias taxonómicas que más carbono almacenaron son Fabaceae (destacando las especies *Gliricidia sepium* y *Platymiscium pleiostachium*) y la familia Mimosaceae (representada por *Inga* spp.), mientras que Apocynaceae fue la que menos carbono almacenó, en este caso, la especie *Stemmadenia donnell-smithii*.

Cuadro 2. Carbono almacenado en árboles (t C ha⁻¹) según familia taxonómica

Nº	Familia	Santa Gertrudis	Los Laureles	Los Chilamates	Las Quebradas	Total
1	Fabaceae	1.80	7.95	0.53	0.63	10.91
2	Mimosaceae	0.71	2.19	1.71	4.89	9.50
3	Sterculiaceae	1.33	1.17	0.00	0.15	2.65
4	Rutaceae	1.73	0.71	0.06	0.24	2.74
5	Apocynaceae	0.12	0.00	0.00	0.00	0.12
6	Anacardiaceae	0.10	2.71	0.00	0.00	2.81
7	Burseraeae	0.34	0.00	0.00	0.00	0.34
8	Boraginaceae	0.29	1.56	0.90	1.07	3.82
9	Lauraceae	0.00	1.73	0.02	0.00	1.75
10	Meliaceae	0.00	1.56	0.38	1.85	3.79
11	Myrtaceae	0.00	0.11	0.53	4.75	5.39
12	Verbenaceae	0.00	3.06	1.00	1.87	5.93
13	Bignoniaceae	0.00	1.56	0.00	0.00	1.56
14	Urticaceae	0.00	0.00	2.53	0.48	3.01
15	Rubiaceae	0.00	1.39	0.03	3.11	4.53
16	Ochnaceae	0.00	0.00	0.22	0.15	0.37
17	Melastomataceae	0.00	0.00	0.00	1.44	1.44
18	Combretaceae	0.00	0.00	0.00	0.58	0.58
19	No determinado	0.00	0.00	0.60	0.49	1.09
	t C ha ⁻¹	6.42	25.70	8.51	21.70	

Los sistemas cafeteros con mayor diversificación de especies arbóreas presentan mayores valores de acumulación de carbono (Orozco *et al.*, 2014, p. 213). Estos mismos autores afirman que la familia Fabaceae es la más representativa (p. 216).

Los volúmenes de carbono en sistemas agroforestales con café son variables y están en dependencia primeramente del diámetro, el que se relaciona con la edad y especie arbórea, seguido del número de árboles por hectárea. De las 19 familias de árboles, dos de ellas pertenecientes a las leguminosas, almacenaron el 29.86 % del carbono. Es importante mencionar que los árboles generan múltiples beneficios al productor y al ambiente como: obtención de leña, frutos y servicios ambientales para la conservación del suelo, producción de oxígeno, belleza escénica, refugio de vida silvestre, entre otros (Moraga *et al.*, 2011, pp. 41 y 46).

Carbono almacenado por arbustos de café (t C ha⁻¹). El Cuadro 3 indica la cantidad de carbono almacenado por los arbustos de café en base al diámetro del tronco y a la densidad de arbustos por hectárea. El SAF que almacenó más carbono fue Las Quebradas con 2.21 t, seguido del SAF Los Chilamates con 1.08, Santa Gertrudis con 0.99 y finalmente el SAF Los Laureles con 0.61 t. En promedio en los cuatro SAF se almacenó 1.22 t C ha⁻¹.

Cuadro 3. Carbono almacenado por arbustos de café (t C ha⁻¹)

Variables	Santa Gertrudis	Los Laureles	Los Chilamates	Las Quebradas
Carbono almacenado en arbustos de café (t C ha ⁻¹)	0.99	0.61	1.08	2.21
Diámetro del tronco de arbustos de café (cm)	2.54	1.82	3.00	3.79
Densidad (número de arbustos ha ⁻¹)	3 130.00	4 080.00	3 266.00	4 177.00
Sombra en el cafetal (%)	80.60	91.26	73.32	70.46

La certificadora Naturland (2019), sostiene en su normativa de certificación que “la densidad de plantación de los arbustos de café no debería superar los 5000 cafetos por hectárea” (p. 40) cumpliéndose en los cuatro SAF con este requisito. Se puede observar en el Cuadro 3 la variable porcentaje de sombra que presenta una relación contraria, aunque no proporcional con el carbono almacenado por los arbustos de café excepto el SAF Las Quebradas quien presentó los mayores diámetros del tronco y densidad de arbustos por hectárea, similar relación obtuvo Pérez y Amador (2021).

Pico (2011), encontró aporte de carbono por parte de los arbustos de café orgánico de 1.78 t C ha⁻¹ (p. 46), siendo superiores a los estimados en este trabajo; sin embargo, los resultados de Connolly y Corea (2007, p. 50) y Aristizabal (2011, p. 53) son inferiores con 1.14 y de 0.56 a 0.75 t C ha⁻¹ respectivamente. En la estimación de carbono almacenado por arbustos de café no aplica el planteamiento de Suárez (2002, p. 60) de no tomar en cuenta la altura en la ecuación alométrica utilizada, debido a que la labor de poda no es tan relevante como en los árboles utilizados para sombra.

Pico (2011, p. 46), Aristizabal (2011, p. 53) y Connolly y Corea (2007, p. 50) afirman que el diámetro promedio del tronco del arbusto y la densidad por hectárea son las variables principales para determinar carbono

RECURSOS NATURALES Y AMBIENTE

almacenado en café, además de la edad la que se relaciona con el diámetro del tronco.

Es importante mencionar que el SAF Las Quebradas presentó mayor densidad de arbustos de café por hectárea y diámetro promedio de tronco con 3.79 cm, mientras que Los Laureles presentó el menor diámetro del tronco promedio por arbusto (1.82 cm) y la mayor cantidad de fallas ha⁻¹ con (664 arbustos), por tanto, las variables diámetro del tronco y densidad influyeron en la cantidad de carbono almacenado por arbustos de café, y en menor cuantía la altura de los arbustos.

Carbono almacenado por el mantillo en los SAF en estudio (t C ha⁻¹). El Cuadro 4 indica que el SAF con mayor aporte de carbono por parte del mantillo fue Santa Gertrudis con 6.61 t C ha⁻¹ seguido de los SAF Las Quebradas, Los Chilamates y Los Laureles con 6.47, 5.96 y 5.81 t C ha⁻¹ respectivamente.

Cuadro 4. Carbono almacenado por el mantillo (t C ha⁻¹)

Sistema agroforestal	Hoja	Rama	Fraccionado	Total
Santa Gertrudis	2.15	2.04	2.42	6.61
Los Laureles	1.52	1.29	3.01	5.81
Los Chilamates	1.34	1.53	3.09	5.96
Las Quebradas	1.82	2.35	2.30	6.47

Pérez *et al.* (2012), afirman que “un SAF con un dosel vegetal alto no disminuye las pérdidas de suelo por erosión hídrica” (p. 53). siendo el SAF Los Laureles quien presentó los árboles más altos en promedio después del SAF Santa Gertrudis.

Aguilar (2005), plantea que “conocer la descomposición y mineralización de los residuos vegetales en el suelo en sistemas agroforestales con café puede contribuir a su manejo” (p. 50). Además, puede generar beneficios diversos como reducir el impacto de la lluvia para reducir la erosión del suelo, mejorar la fertilidad del suelo a través del reciclaje y consecuentemente disminuir el uso de productos químicos.

Medina, Pérez y Ruiz, (2008), afirman que “los aportes de carbono almacenado por mantillo al suelo están en un rango de 1.7 a 0.97 t C ha⁻¹ argumentando que las especies utilizadas para sombra son las que mayor aporte realizan al mantillo del suelo comparada con el cafeto” (p. 36). Y que además los aportes dependen de la densidad, edad, la especie y manejo del sistema por el productor. Por su parte Connolly y Corea (2007), encontraron en su estudio aportes de carbono por parte del mantillo en sistema de café ecoforestal de 0.76 t C ha⁻¹ (p. 50).

Según Pérez, Valdez y Ordaz (2012, p. 53), afirman que “un dosel alto disminuye pérdidas

por erosión lo que puede contribuir positivamente con las cantidades de carbono almacenado en mantillo” (p. 53). En SAF Santa Gertrudis y contrariamente en SAF Los Chilamates donde se encontraron los árboles con el dosel más bajo 9.93 m, pero además Santa Gertrudis presenta los arbustos de café con mayor altura 2.17 m y más jóvenes con ocho años. Por su parte en el SAF Las Quebradas con la mayor densidad arbórea, así como la mayor cantidad de árboles leguminosos están contribuyendo positivamente al carbono almacenado en mantillo. Por su parte en el SAF Los Laureles quien presenta el menor aporte de carbono almacenado en mantillo puede estar siendo influenciado por la edad del cafetal 30 años según el productor y que al momento del estudio estaba en proceso de renovación, además fue el único que presentó la especie *Swietenia humilis* 76 individuos ha⁻¹ la cual según Centeno y Herrera (2005, p. 22) produce menor cantidad de mantillo comparada con las leguminosas.

Carbono almacenado por el suelo en los SAF (t C ha⁻¹). El cuadro número 5, demuestra que el SAF con mayor aporte de carbono por el suelo fue Los Chilamates con 103.68 t C ha⁻¹, seguido por el SAF Santa

Gertrudis, Los Laureles y Las Quebradas con 95.48, 65.66 y 58.62 t C ha⁻¹ respectivamente. La densidad aparente y el carbono orgánico en el suelo son las variables que inciden directamente con el volumen de carbono almacenado en el suelo.

Medina, Pérez y Ruiz, (2008), “encontraron más carbono en el suelo de cafetales de mayor edad y a 10 y 20 cm de profundidad, resultando que a 0 - 20 cm se encontró el 73-77 % del total de carbono medido hasta los 30 cm” (p. 37); lo que indica que el movimiento del humus en el perfil del suelo es de arriba hacia abajo. Los autores encontraron un rango de 74.24 a 56.75 t C ha⁻¹ almacenado en el suelo a una profundidad de 20 cm. La cantidad de carbono en el suelo puede estar relacionada con el aporte de mantillo y su velocidad de descomposición, obras de conservación de suelos y aguas presentes en el SAF, drenaje, precipitación, temperatura y manejo del suelo por el productor.

Cuadro 5. Carbono almacenado por el suelo (t C ha⁻¹)

Variables	Santa Gertrudis	Los Laureles	Los Chilamates	Las Quebradas
Densidad aparente del suelo (g cm ⁻³)	1.09	1.14	1.20	0.79
Carbono orgánico en el suelo (%)	4.38	2.88	4.32	3.71
Carbono almacenado en suelo (t C ha ⁻¹)	95.48	65.66	103.68	58.62

RECURSOS NATURALES Y AMBIENTE

Larios *et al.* (2014), afirman que “las prácticas agroecológicas en plantaciones con café propician un suelo con menor densidad aparente (DA) y valores mayores de carbono orgánico” (p. 67). Connolly y Corea (2007) afirman que “encontraron en el suelo cantidades de 142.78 t C ha⁻¹ a una profundidad de muestreo de 30 cm planteando que la profundidad del muestreo puede incidir en los resultados” (p. 51). Los mismos autores citando a Dixon (1995) indican que en sistemas agroforestales el carbono en el suelo va de 12 – 228 t C ha⁻¹ (p. 51).

Se concuerda con Larios *et al.* (2014), en que la baja densidad aparente es un indicador del probable manejo agroecológico aplicado en el agroecosistema, pero no se coincide en que esto conlleva a valores mayores de carbono orgánico según los resultados de este estudio. Los valores encontrados son ligeramente superiores a los descritos por Medina *et al.* (2008) y están en el rango presentado por Dixon (1995, citado por Connolly, 2008).

Contribución total del reciclaje (t C ha⁻¹). En términos generales la mayor fuente de carbono almacenado promedio por hectárea en los cuatro SAF en estudio fue el suelo con 80.86 t, seguido del aporte de los árboles 15.58 t, mantillo con 6.21 t y finalmente los arbustos de café con 1.22 t ha⁻¹ C respectivamente. El SAF Los Chilamates es quien más carbono almacena gracias al aporte almacenado por el suelo.

Cuadro 6. Contribución total del reciclaje (t C ha⁻¹)

Productor/fuente	Santa Gertrudis	Los Laureles	Los Chilamates	Las Quebradas	Promedio (t C ha ⁻¹)
Suelo	95.48	65.66	103.68	58.62	80.86
Árboles	6.43	25.70	8.50	21.71	15.58
Mantillo	6.61	5.81	5.96	6.47	6.21
Café	0.99	0.61	1.08	2.21	1.22
Total (t C ha ⁻¹)	109.51	97.78	119.22	89.01	103.88

Según Medina *et al.* (2009), afirman que los árboles para sombra son la segunda fuente de carbono después del suelo en sistemas agroforestales con café y los arbustos de café el último lugar (pp. 32 y 33). Finalmente sostienen que la biomasa y contenido de carbono está influenciado por la edad, densidad y especies de árboles para sombra y café.

Similar resultado obtuvo Connolly y Corea (2007, p. 52) según aportes de árboles, arbustos de café a excepción de mantillo (0.76) y el aporte de suelo (142.78 t) a 30 cm de profundidad del suelo. Birdsey (1992, citado por Aristizabal, 2011), sostiene que “en la distribución del carbono en el agroecosistema el suelo representa más del 60 % del total, seguido de la biomasa aérea con un 30 % y en último lugar la necromasa con un 10 %” (p. 50), lo que coincide con los resultados de este trabajo.

Los aportes de carbono almacenado por el suelo (80.86 t C ha⁻¹) fueron resultado del carbono orgánico y de su densidad aparente (DA), en cambio el aporte de carbono

por los árboles (15.58 t C ha⁻¹) se considera fue conferido a su abundancia y diámetro a la altura del pecho, el aporte de mantillo (6.24 t ha⁻¹ C) debido al volumen aportado en materia seca y finalmente el aporte de los arbustos de café (1.22 t C ha⁻¹) por diámetro del tronco, densidad, porcentaje de sombra, altura y edad.

El valor agregado por servicios ambientales en concepto de almacenamiento de carbono son un atractivo económico y ecológico para los productores de café con sombra. Los precios del carbono pueden oscilar entre 1 a 119 dólares americanos por tonelada de CO₂, lo que está en dependencia del mecanismo de pago convenido y políticas climáticas, sin embargo, el Fondo Monetario Internacional (FMI) calcula el precio promedio mundial de carbono en US\$2.00 por t CO₂ (World Bank Group [WBG], 2020, pp. 18 y 21).

Basado en lo descrito por WBG (2020, pp. 18 y 21) los SAF Los Chilamates y Las Quebradas con el mayor y menor volumen de carbono almacenado podrían percibir en concepto de almacén de carbono 874.36 y 652.80 dólares por hectárea en base al CO₂ retenido, según la relación de carbono y oxígeno de 3.667 y el precio de US\$2.00 tonelada de CO₂ planteada por FMI.

Porcentaje de sombra de los sistemas agroforestales.

En la Figura 1 se presenta el porcentaje de sombra de los sistemas agroforestales. El SAF Los Laureles presentó el mayor porcentaje de sombra, seguido de Santa Gertrudis. Las Quebradas es el sistema con el menor porcentaje de sombra registrado.

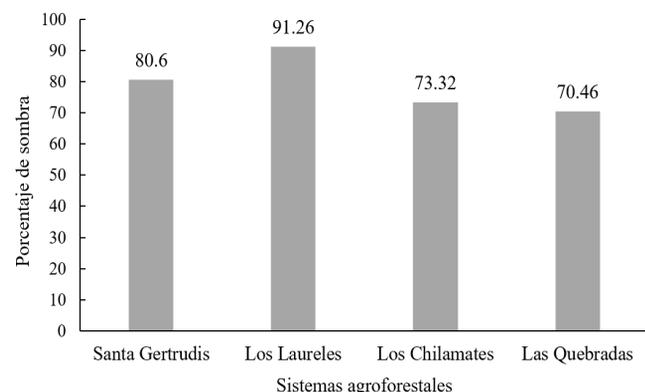


Figura 1. Porcentaje de sombra según sistema agroforestal.

La certificadora Naturland, con la que actualmente trabajan los productores de la zona, en sus normas “establece un mínimo de 40 % de sombra en SAF con café y mínimo de 70 árboles ha⁻¹ y al menos 12 especies con dominancia no

RECURSOS NATURALES Y AMBIENTE

mayor del 60 % de la especie más abundante, no menos de dos a tres estratos” (Naturland, 2019, p. 40). Mientras que Zapata (2019) menciona que sombra por encima del 40 % propicia una disminución de los rendimientos (p. 695). Por lo que se requiere reorientar el manejo de la sombra en estos sistemas, para asegurar un mayor aprovechamiento de la luz.

Medina *et al.* (2008), afirman que “los aportes de carbono almacenado por mantillo al suelo están en un rango de 1.7 t C ha⁻¹ a 0.97 t C ha⁻¹ argumentando que las especies utilizadas para sombra son las que mayor aporte realizan al mantillo del suelo comparada con el café” (p. 36). Según Pérez *et al.* (2012, p. 53), “un dosel alto disminuye pérdidas por erosión lo que puede contribuir positivamente con las cantidades de carbono almacenado en el mantillo” (p. 53).

En el Cuadro 3 la variable porcentaje de sombra presenta una relación contraria, aunque no proporcional con el carbono almacenado por los arbustos de café excepto, el SAF Las Quebradas quien presentó los mayores diámetros del tronco y densidad de arbustos por hectárea, similar relación obtuvo Pérez y Amador (2021).

Análisis de componentes principales. En la Figura 2 se representa la relación de cada una de las 13 variables representadas como vectores que parten del eje (0, 0), dicha representación se estructura con dos ejes, el de las abscisas o dimensión uno, explica la máxima varianza 58.4 % y el eje de las ordenadas o dimensión dos que explica el 33.7 %. Ambas dimensiones explican el 92.1 % de la variación total.

En la dimensión uno las variables que contribuyen en mayor medida a la explicación de la varianza son el diámetro de árboles con 12.85, pendiente del terreno 12.24, altura de árboles 12.18, carbono orgánico del suelo 11.86 y altura de arbustos de café con 11.17 % y carbono de árboles con 8.51 % representando seis variables el 68.81 % de la explicación de la varianza en la dimensión uno. En la dimensión dos, cuatro variables explican más del 70 % de la varianza; densidad aparente del suelo 20.63, carbono almacenado por arbustos de café 17.71, número de árboles 17.36 y carbono almacenado en el suelo 14.52 %.

Se reafirma (Figura 2) que una mayor altura, diámetro y número de árboles propicia mayores valores de carbono almacenado por árboles relacionado con menores valores de carbono orgánico en el suelo, altura del café y carbono almacenado por el mantillo y el suelo. Se observa que el carbono almacenado por mantillo se relaciona con el diámetro y altura de los arbustos de café y del carbono orgánico del suelo mientras que a mayores dimensiones de árboles, pendiente y porcentaje de sombra se encontrará menores volúmenes de carbono en mantillo.

Se observa también que el carbono almacenado por arbustos de café es beneficiado por el diámetro y altura de los arbustos y que está relacionado con el carbono del mantillo. Una alta densidad aparente y carbono orgánico del suelo

benefician los volúmenes de carbono almacenado en el suelo, observando una relación contraria con las variables de árboles como altura, diámetro y carbono de árboles.

Finalmente se observa que a más carbono almacenado por árboles habrá entonces menos de mantillo, suelo y café, caso contrario ocurre entre el carbono almacenado por mantillo y el café que muestran relación positiva.

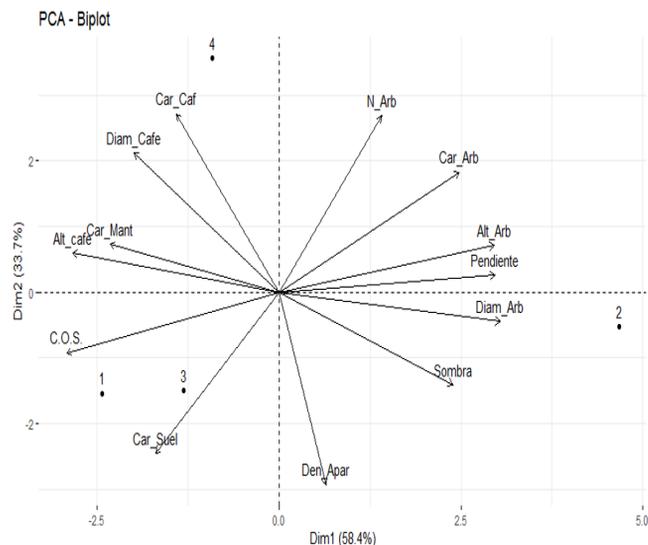


Figura 2. Análisis de componentes principales de la estimación de carbono almacenado en sistemas agroforestales con café.

Car_Caf=carbono café, Car_Suel=carbono en el suelo, Car_Arb=carbono en árboles, Alt_Arb=altura árbol, Diam_Arb= diámetro de árboles, Den_Apar= densidad aparente del suelo, C.O.S.= carbono orgánico del suelo, Alt_Café= altura de arbustos de café, Car_Mant=carbono de mantillo, Diam_café=diámetro de arbusto de café, N_Arb= número de árboles, 1=finca Santa Gertrudis, 2= Finca Los Laureles, 3= Finca Los Chilamates, 4=Finca Las Quebradas.

El análisis de componentes principales (ACP), es un método algebraico estadístico que trata de sintetizar y generar una estructura a la información contenida en una matriz de datos, homologando dicha matriz a un espacio vectorial (Lozares y López, 1991, p. 33). Un vector entre más se aleja del centro del eje tendrá mayor valor y entre más se acerca del eje brindará un mayor aporte a la explicación de la dimensión.

Ayala y Almanza (2021), afirman que “existe una alta relación entre el almacenamiento de nitrógeno y carbono con la disponibilidad de materia orgánica e inverso con la densidad aparente del suelo” (p. 7). Llanes *et. al.* (2017), afirman que “un suelo con poca cobertura vegetal es más vulnerable a la pérdida de materia orgánica por lo que precisa que se deben promover sistemas con mayor cobertura de rastrojos y arbórea como los sistemas agroforestales” (p. 62).

“La densidad arbórea y el grosor del diámetro son características que inciden en la fijación y acumulación de

RECURSOS NATURALES Y AMBIENTE

carbono en la biomasa del arbolado” (Sánchez *et al.*, 2018, p. 55). Masuhara *et al.* (2015), evaluando carbono almacenado en diferentes usos de la tierra afirma que “en bosque de montaña se localiza mayores volúmenes de carbono en la biomasa aérea que en un SAF con café y árboles de uso múltiple, pero que el carbono orgánico del suelo es mayor en éste” (p. 66). Lo que también se puede observar en la figura 2 donde el carbono de árboles es contrario al carbono orgánico del suelo.

Ovalle Rivera (2016), plantea que “el suelo es quien más carbono almacena seguido de los árboles y arbusto de café, pero además que la tasa de fijación depende de la densidad y tipo de árbol” (p. 4). El mismo autor afirma que “el

porcentaje de sombra afecta directamente el rendimiento del cultivo del café” (p. 4).

CONCLUSIONES

El componente suelo es quien más carbono almacena en promedio con 80.86 t C ha⁻¹, seguido de los árboles, mantillo y arbustos de café con 15.58, 6.21 y 1.22 t C ha⁻¹. Los sistemas agroforestales que presentaron los mayores y menores volúmenes de carbono almacenado fueron Los Chilamates y Las Quebradas con 119.22 y 89.01 t C ha⁻¹ respectivamente.

Los productores podrían generar otros ingresos en concepto de carbono almacenado por un monto entre 874.36 a 652.80 dólares americanos por hectárea en base al CO₂ retenido.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar Bustamante, V. (2005). Análisis y datos provenientes de ensayos de descomposición y mineralización de residuos vegetales. *La Calera*, 5(6), 50-54. <https://lacialera.una.edu.ni/index.php/CALERA/article/view/51/51>
- Andrade, H. J. e Ibrahim, M. (2003). Cómo monitorear el secuestro de carbono en sistemas silvopastoriles. *Agroforestería de las Américas*, 10(39-40), 109-116. https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/6950/Como_monitorear_el_secuestro.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Argüello Guerrero, A. y Olivero Palma, M. (2015). *Análisis de la cadena de valor del café convencional periodo 2012-2013* [Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, UNAN-Managua]. Repositorio Institucional. <https://repositorio.unan.edu.ni/3950/1/3237.pdf>
- Aristizabal, J. D. (2011). Desarrollo de modelos de biomasa aérea en sombríos de cafeto (*Coffea arabica* L.) mediante datos simulados. *Revista U.D.C.A Actualidad y Divulgación Científica*, 14(1), 49-56. <https://doi.org/10.31910/rudca.v14.n1.2011.756>
- Ayala Aragón, O. y Almanza López, M. (2021). Almacenamiento de carbono orgánico en suelos agrícolas de la zona intersalar potosino en diferentes tipos de uso. *RIIARn*, 8(2), 7-19. <https://doi.org/10.53287/pokx3560jc91k>
- Buitrago Trujillo, N. (2005). *Evaluación del potencial hídrico del entorno de la Ciudad de Boaco* [Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, UNAN-Managua]. Repositorio Institucional. <https://repositorio.unan.edu.ni/2380/>
- Centeno Ramírez, T. y Herrera Hernández, D. (2005). *Caracterización biofísica y suelos de los sistemas cafetaleros en la zona baja húmeda de Matagalpa* [Tesis de Ingeniería, Universidad Nacional Agraria]. Repositorio Institucional. <https://repositorio.una.edu.ni/2085/>
- Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (2002). *Inventario forestal para bosques latifoliados en América Central*. CATIE. https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/2600/Inventarios_forestales_para_bosques_latifoliados.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Centro de Trámites de las Exportaciones. (2020). *Comparativo de los principales productos exportados*. <https://www.cetrex.gob.ni/Portalestadistico/>
- Climate-data.org. (s.f.). *Clima de Boaco*. <https://es.climate-data.org/americas-del-norte/nicaragua/boaco/boaco-30644/>
- Connolly Wilson, R. y Corea Siu, C. (2007). *Cuantificación de la captura y almacenamiento de carbono en sistema agroforestal y forestal en seis sitios de cuatro municipios de Nicaragua* [Tesis de Ingeniería, Universidad Nacional Agraria]. Repositorio Institucional. <https://repositorio.una.edu.ni/1103/1/tnp01c752.pdf>
- Grupo consultivo de expertos. (s.f.). *Manual para el sector del uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura (UTCUTS)*. <https://unfccc.int/sites/default/files/11-bis-handbook-on-lulucf-sector.pdf>
- Incer Barquero, J. (2000). *Geografía Dinámica de Nicaragua* (2. ed.). HISPAMER.
- Larios González, R. C., Salmerón Miranda, F. y García Centeno, L. (2014). Fertilidad del suelo con prácticas agroecológicas y manejo convencional en el cultivo del café (*Coffea arabica* L.). *La Calera*. 14(23), 67-75. <https://www.camjol.info/index.php/CALERA/article/view/2660/2411>
- Llanes, G., Rizo Bermúdez, D., Mendoza Corrales, R., Avilés Silva, E. y Duarte Canales, H. (2017). Agricultura de conservación de suelos y su efecto en la erosión hídrica y propiedades hidrofísicas en la unidad hidrográfica Quebrada arriba, Yalaguina, 2017. *La Calera*, 20(34), 57–63. <https://lacialera.una.edu.ni/index.php/CALERA/article/view/417/587>
- Lozares Colina, C. y López Roldan, P. (1991). El análisis de componentes principales. *Papers Revista de Sociología*, 37, 31-63. <https://papers.uab.cat/article/view/v37-lozares-lopez-2/pdf-es>
- Masuhara, A., Valdés, E., Pérez, J., Gutiérrez, D., Vázquez, J. C., Salcedo, E., Juárez, M. y Merino, A. (2015). Carbono almacenado en diferentes sistemas agroforestales de café en Huatusco, Veracruz, México. *Revista Amazónica de Ciencia y Tecnología*, 4(1), 66 – 93. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5271975>

RECURSOS NATURALES Y AMBIENTE

- Medina Benavides, C., Calero Gómez, C., Hurtado, H. y Vivas Soto, E. (2009). Cuantificación de carbono en la biomasa aérea de café (*Coffea arabica* L.) con sombra, en la comarca Palo de Sombrero, Jinotega, Matagalpa. *La Calera*, 9(12), 28-34. <https://lacialera.una.edu.ni/index.php/CALERA/article/view/130/130>
- Medina Benavides, C., Pérez Z., M. y Ruíz Q., J. (2008). Cuantificación del carbono almacenado en suelo de café (*Coffea arabica* L.) con sombra en la comarca Palo de Sombrero, Jinotega, Nicaragua. *La Calera*, 8(10), 33-39. <https://lacialera.una.edu.ni/index.php/CALERA/article/view/99/99>
- Moraga Quezada, P., Bolaños Taleno, R., Pilz, M., Munguía Hernández, R. Jürgen, P., Barios, M., Haggar, J. y Gamboa Moya, W. (2011). Árboles de sombra e intensidad del cultivo afectan el rendimiento de café (*Coffea arabica* L.) y la valoración ecológica en Masatepe, Nicaragua. *La Calera*, 11(17), 41-47. <https://lacialera.una.edu.ni/index.php/CALERA/article/view/141/141>
- Naturland. (2019). *Normas de Naturland: Producción*. https://www.naturland.de/images/SP/Naturland_SP/Normas/Naturland-Normas_AGRicultura-organica.pdf
- Organización internacional del café. (2013). Informe acerca de la misión técnica interagencial a Nicaragua: Análisis de la caficultura en Nicaragua. <http://www.ico.org/documents/cy2012-13/ed-2166c-report-nicaragua.pdf>
- Orozco, G., Ordoñez, E., Suárez, S. y López, C. (2014). Almacenamiento de carbono en arreglos agroforestales asociados con café (*Coffea arabica*) en el sur de Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 5(1), 213–221. <https://doi.org/10.22490/21456453.956>
- Ovalle Rivera, O. (2016). *Almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales con café en Costa Rica*. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). <https://hdl.handle.net/10568/92854>
- Pérez Amador, E. y Amador Lira, L. (2021). *Estimación de la composición florística y carbono almacenado en sistemas agroforestales con café (Coffea arabica L.) en comarca Loma de Cafen, Boaco, 2021* [Tesis de grado]. Universidad Nacional Agraria.
- Pérez Nieto, J., Valdés Velarde, E. y Ordaz Chaparro, V. (2012). Cobertura vegetal y erosión del suelo en sistemas agroforestales de café bajo sombra. *Terra Latinoamericana*, 30(3), 249-259. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57325509001>
- Pico Mendoza, J. (2011). *Evaluación de servicios ambientales en sistemas agroforestales con café bajo diferentes tipos de certificaciones en Turrialba Costa Rica* [Tesis de Maestría, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza]. Repositorio del Conocimiento Institucional. https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/5048/Evaluacion_de_servicios_ambientales.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Sampieri Hernández, R. (2014). *Metodología de la investigación* (6ª Ed.). McGraw Hill.
- Sánchez Rodas, N., Iriás Gutiérrez, N., Calero González, C. y Alonzo Serrano, E. (2018). Biomasa forestal, carbono fijado y almacenado en sistema bosque y sistema silvopastoril en siete fincas del municipio de Mulukukú, RACN, 2018. *La Calera*, 20(34), 49–56. <https://lacialera.una.edu.ni/index.php/CALERA/article/view/415/594>
- Suárez Pascua, D. I. (2002). *Cuantificación y valoración económica del servicio ambiental almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales de café en la comarca Yassica Sur Matagalpa, Nicaragua* [Tesis de Maestría, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza]. Repositorio del Conocimiento Institucional. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/3735>
- Suárez, D., Segura, M. y Kanninen, M. (2004). Estimación de la biomasa aérea total en árboles de sombra y plantas de café en sistemas agroforestales en Matagalpa, Nicaragua, usando modelos alométricos. *Agroforestería de las Américas*, (41-42), 112-119. https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/6233/Estimacion_de_la_biomasa_aerea.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Valkila, J. (2009). Fair Trade Organic Coffee Production in Nicaragua-Sustainable development or a poverty trap? *Ecological Economics*, 68(12), 3018-3025. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.07.002>
- World Bank Group. (2020). *Situación y tendencias de la fijación del precio al carbono 2020*.
- Zapata Arango, P. (2019). Composición y estructura del dosel de sombra en sistemas agroforestales con café de tres municipios de Cundinamarca, Colombia. *Ciencia forestal*, 29(2), 685-697. <https://doi.org/10.5902/1980509827037>