

ARTÍCULO ORIGINAL

Carbono almacenado total en sistemas agroforestales con Theobroma cacao en el distrito de Luyando, Huánuco

José Luis Huaynates Natividad¹ | José Dolores Lévano Crisóstomo² | Jaime Torres García²

Filiación Institucional

¹. Municipalidad Provincial de Leoncio Prado, Tingo María, Perú.

². Universidad Nacional Agraria de la Selva, Tingo María - Perú

Palabras clave:

Biomasa aérea,
Biomasa Aérea,
Clasificación
fisiográfica, Sistemas
silvopastoriles,
Sumidero de carbono.

RESUMEN

Los agricultores del caserío Marona, desconocen la capacidad de almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales de cacao (*Theobroma cacao*) CCN-51 establecidos en tres unidades fisiográficas distintas (terrazza baja, terraza alta y colina baja), realizando sus prácticas de manejo de manera tradicional y cultural sin considerar las diferencias edafoclimáticas ni el potencial de estos sistemas para mitigar el cambio climático mediante el secuestro de carbono en biomasa y suelo, por lo que el objetivo es evaluar el contenido de carbono de sistemas agroforestales en *Theobroma cacao* de tres unidades fisiográficas en el distrito Luyando- Huánuco. Los resultados mostraron que, en términos porcentuales, en la terraza baja, el cacao almacenó el 34,93% del carbono total del sistema agroforestal (229,48 t/ha), mientras que, en la colina baja, almacenó el 58,31% del carbono total (81,72 t/ha). Se concluye que, las mayores acumulaciones de carbono orgánico en el suelo ocurren en zonas de cultivo con sombra, especialmente en los primeros 5 cm del perfil del suelo. El sistema cacaotero con mayor acumulación de biomasa total se encontró en las especies de Caoba componente forestal introspectivos de la unidad fisiográfica Terraza baja. La cantidad de carbono almacenada en los árboles es mayor en *Swietenia macrophylla* King y *Guazuma crinita* Mart componente forestal introspectivos de la unidad fisiográfica Terraza baja. La mayor cantidad y proporción del carbono vegetal está en las raíces de los árboles del bosque seco cuyo componente forestal tiene como especie representativa la guaba. La más baja acumulación de Carbono se encuentra en la hojarasca, en las tres zonas de vida.

Total carbon stored in agroforestry systems with *Theobroma cacao* in the district of Luyando, Huánuco

Key words:

Aboveground
biomass, carbon
sink, physiographic
classification,
silvopastoral systems.

ABSTRACT

Farmers in the village of Marona are unaware of the carbon storage capacity of CCN-51 cocoa (*Theobroma cacao*) agroforestry systems established in three distinct physiographic units (lower terrace, upper terrace, and lower hill), and they carry out their management practices in a traditional and cultural manner without considering edaphoclimatic differences or the potential of these systems to mitigate climate change through carbon sequestration in biomass and soil. Therefore, the objective is to evaluate the carbon content of *Theobroma cacao* agroforestry systems in three physiographic units in the Luyando-Huánuco district. The results showed that, in percentage terms, on the low terrace, cacao stored 34.93% of the total carbon in the agroforestry system (229.48 t/ha), while on the low hill, it stored 58.31% of the total carbon (81.72 t/ha). It is concluded that the highest accumulations of organic carbon in the soil occur in shaded croplands, especially in the top 5 cm of the soil profile. The cocoa system with the highest accumulation of total biomass was found in the Mahogany species, which are forest components of the Low Terrace physiographic unit. The amount of carbon stored in trees is highest in *Swietenia macrophylla* King and *Guazuma crinita* Mart, which are forest components of the low terrace physiographic unit. The greatest amount and proportion of plant carbon is found in the roots of trees in the dry forest, whose forest component is represented by the guava species. The lowest carbon accumulation is found in litter across all three life zones.

Citar como: Huaynates Natividad, J. L., Lévano Crisostomo J. D. & Torres García J. Carbono almacenado total en sistemas agroforestales con *Theobroma cacao* en el distrito de Luyando, Huánuco. *Revista de Investigación y Amazonía*. 2026, 16(2):14-26. DOI: <https://doi.org/10.69507/revia.2.16.2>.

INTRODUCCIÓN

Tanto en la literatura científica como en los medios convencionales, se documenta ampliamente que una de las mayores dificultades que afronta la humanidad en el siglo XXI es el cambio climático. A nivel global, el cambio climático derivado de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) representa una gran preocupación para la humanidad. En la actualidad, hay evidencia científica que demuestra la necesidad de implementar medidas efectivas para evitar los efectos irreversibles del cambio climático (Hernández et al., 2021). Fenómenos como el incremento de la temperatura, la desaparición de especies animales y vegetales, y el agotamiento de los recursos naturales se reconocen como factores clave relacionados con las emisiones de carbono (González et al., 2023). El dióxido de carbono (CO_2), el principal gas de efecto invernadero, pasó de 275 a 414 partes por millón (ppm) para el año 2021. En la actualidad, el excedente de 64 ppm de CO_2 está generando impactos negativos en la agricultura, la seguridad alimentaria y los recursos naturales (Marcelo et al., 2023).

No obstante, en el distrito de Luyando, Huánuco, la actividad agropecuaria y los sistemas de producción agrícola tradicional generan impactos que contribuyen a la emisión de carbono a la atmósfera, intensificando el efecto invernadero y sus consecuencias ambientales adversas. En este escenario, los sistemas agroforestales (SAF) con cacao CCN51 emergen como una alternativa sostenible, al ofrecer beneficios ambientales tales como el secuestro de carbono, la conservación de la biodiversidad y la mejora de las propiedades del

suelo sin embargo, los agricultores del caserío Marona, desconocen la capacidad de almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales de cacao (*Theobroma cacao*) CCN-51 establecidos en tres unidades fisiográficas distintas (terrazza baja, terraza alta y colina baja), realizando sus prácticas de manejo de manera tradicional y cultural sin considerar las diferencias edafoclimáticas ni el potencial de estos sistemas para mitigar el cambio climático mediante el secuestro de carbono en biomasa y suelo.

En este marco, la implementación de sistemas agroforestales (SAF) para la recuperación de suelos degradados facilita la diversificación de la producción de biomasa y contribuye a fortalecer la resiliencia ecológica, económica y social de las áreas impactadas por actividades humanas (Siqueira et al., 2020).

En este sentido, el objetivo de la investigación es evaluar el contenido de carbono de sistemas agroforestales en *Theobroma cacao* (cacao) de tres unidades fisiográficas en el distrito Luyando-Huánuco.

MATERIALES Y MÉTODOS

Lugar de ejecución

Fue realizado en el caserío de Marona con una fisiografía de Terraza baja, Terraza alta y colina baja la cual se muestra en la Figura 1. Estas parcelas que se encuentran en la región Huánuco, provincia de Leoncio prado y Distrito de Luyando. Los detalles de la ubicación geográfica y altitud se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Datos de la ubicación geográfica de las tres unidades fisiográficas en Luyando

Ubicación				
Fisiografía	Transecto	mE	mN	Altitud m.s.n.m
Terraza alta (Tb)	1 ha	375354,06	8974947,99	735,397
Terraza baja (Tb)	1 ha	375354,06	8974947,99	735,454
Colina baja (Cb)	1 ha	375354,06	8974947,99	735,511

La investigación se llevó a cabo en tres sistemas agroforestales (SAF), con diferentes unidades fisiográficas (Figura 1); terraza alta con 375354.06 m E, 8974947.99 m N, 735.397 m.s.n.m.; respecto

de la terraza baja con 35354.06 m E; 8974947.99 m N; 735.454 m.s.n.m.); y por último el tercer sistema colina baja, 375354.06 m E; 8974947.99 m N; 735.511 m.s.n.m.).

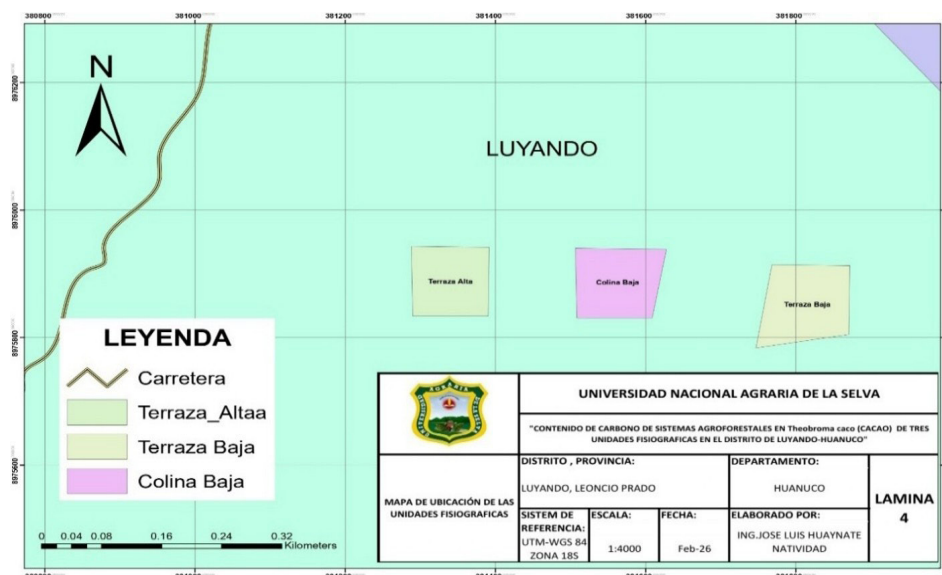


Figura 1. Mapa de ubicación de los sistemas agroforestales de Terraza alta (Ta), Terraza baja (Tb) y Colina baja (Cb)

Materiales y equipos

Respecto a los materiales se utilizó: una wincha de 100 m y 3 m, dos tijeras de podar, 02 Palas rectas, 02 picos, 04 machetes, 80 cilindros Uhlands de 85 cc, 06 plumones indeleble, 01 millar de papel periódico, 02 millares de bolsas de plásticos de diferentes tamaños, 20 costales de polietileno de 50 kg, 01 Marco de madera de 1 m x 1 m, 01 Marco de madera de 0,5 m x 0,5 m; 01 docena de lapiceros, 01 docena de lápices, 01 tablero de campo, 02 libretas de campo, 01 cinta métrica, 01 martillo de madera, 01 martillo de Geólogo, 01 tabla Munsell de color de suelos.

Con respecto a los equipos se usó un receptor GPS, una cámara fotográfica, una estufa, una balanza analítica, un equipo de cómputo, una calculadora científica.

Variable de estudio

Variable: Carbono almacenado total: Carbono almacenado en plantaciones de cacao CCN-51, carbono en el cultivo de cacao en tres fisiografías, en plantas herbáceas, carbono en las hojarascas, carbono orgánico del suelo.

Componentes de estudio

El estudio se efectuó en base a los siguientes componentes que se describen en la Tabla 2. Cabe resaltar que no se trabajó con un modelo experimental específicamente por que se trabajó con puntos de muestreo al azar específicamente a través de ocho transectos en cada parcela de estudio en las cuales en cada uno de ellos se extrajeron muestras para los parámetros de evaluación, cada parcela tiene 1 ha en promedio.

Tabla 2. Componentes de estudio

Entrada (planta)	Unidad experimental (Fisiografías)	Salida (Parámetros de estudio)
Cacao CCN-51	Terraza baja (Tb)	Distanciamiento de 3x3m; edad 7 años; pendiente baja o suave (generalmente entre 1° y 5°); el uso anterior era platanal.
Cacao CCN-51	Terraza alta (Ta)	Distanciamiento de 3x3m; edad 7 años; generalmente presentan pendientes entre 0° y 8° (0% - 15%), el uso anterior era platanal.
Cacao CCN-51	Colina Baja (Cb)	Distanciamiento de 3x3m; edad 7 años; con pendiente de 5° a 15° en terrenos más manejables, el uso anterior era platanal.

Análisis estadístico

Los resultados se analizaron mediante estadística descriptiva. La normalidad de los datos se comprobó con la prueba de Shapiro Wilk. Para la comparación de dos muestras independientes, se aplicó la prueba T si existía homogeneidad de varianzas ($p > 0,05$), determinada mediante la prueba de homocedasticidad; de lo contrario, se utilizó la prueba de Wilcoxon.

Metodología

Ambas parcelas de cacao CCN51 y diferentes unidades fisiográficas, manejados bajo el sistema agroforestal, se encuentran en el distrito de Luyando. El SAF con cacao CCN-51 está ubicado en la Terraza baja (Tb), El SAF con cacao CCN-51 está ubicado en la Terraza alta; el SAF con cacao CCN-51 está ubicado en Colina baja (Cb).

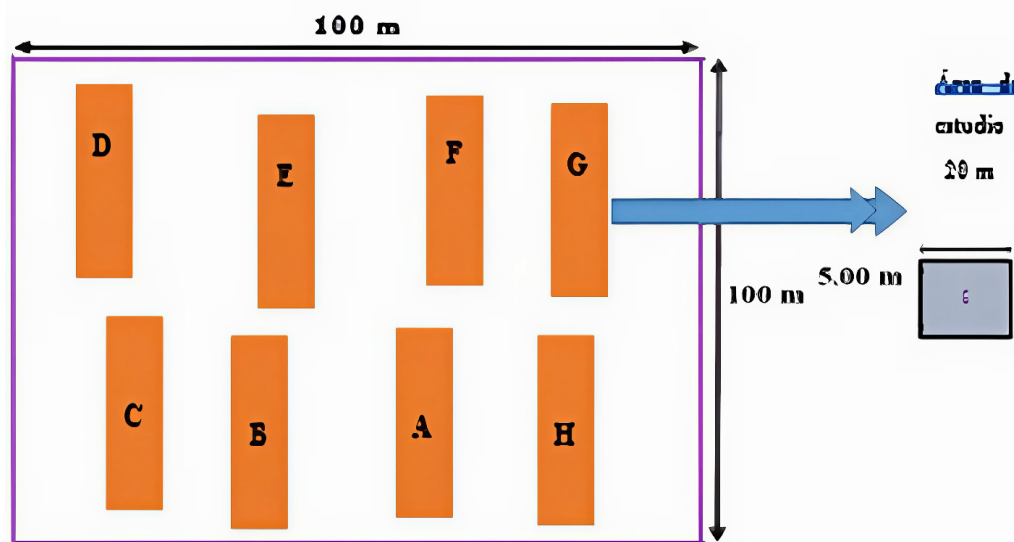


Figura 2. Detalle de la parcela con sus ocho transectos internos

Las parcelas tienen 1 ha en promedio, y se procedió a delimitar ocho transectos dentro de cada parcela (Ver Tabla 1 y Figura 2), en el caso de la fisiografía Terraza baja (Tb) y Terraza alta (Ta) se tuvo los transectos codificados (A, B, C, D, E, F, G y H) y para la fisiografía Colina baja (Cb) (I, J, K, L, M, N, O y P).

Parámetros por evaluar de acuerdo con los objetivos

Carbono almacenado en cacao CCN-51 en tres unidades fisiográficas

Se excavaron mini calicatas en cada cuadrante para recolectar muestras de suelo estratificado a profundidades de 0-10, 10-20 y 20-30 cm. Se recolectó un promedio de 500 g de suelo de cada transecto, se codificó adecuadamente y se transportó al laboratorio para la determinación de carbono mediante el método Walkley-Black tomado en cuenta lo propuesto lo detallado en el Centro Mundial Agroforestal (Rügnitz et al., 2009).

Carbono almacenado de cacao CCN-51 frente las especies arbóreas, herbáceas y hojarasca en tres unidades fisiográficas

El carbono de la biomasa vegetal se estimó mediante el método alométrico (Lapeyre, T. et al., 2002), la metodología recomendada por la Empresa

Brasileña de Investigación Agropecuaria (EMBRAPA), a través de su Centro Nacional de Investigación Forestal, que fue pionero en este estudio en 2022 con la publicación del Documento 73, «Metodología para la estimación del contenido y almacenamiento de carbono en diferentes sistemas de uso de la tierra». Este fue un esfuerzo científico conjunto entre el Centro Internacional de Investigación en Agroforestería (ICRAF) y Embrapa Florestas.

Parámetros de estudio

- **Biomasa arbórea viva.** – Se evaluó en rodales de árboles con diámetros superiores a 2,5 cm. En transectos de 5 x 20 cm, se inventariaron todos los árboles con un diámetro a la altura del pecho (DAP) superior a 2,5 cm. El diámetro basal del cacao aromático se midió a 30 cm del suelo, mientras que, para el componente forestal, el DAP se midió a 1,30 m del suelo para todos los árboles con un DAP superior a 2,5 cm.
- **Biomasa arbustiva (BAb) y herbácea (Hbh).** - Incluyó vegetación del suelo y plantas con diámetros inferiores a 2,5 cm, gramíneas y otras hierbas. El material herbáceo y arbustivo se muestreó directamente utilizando dos cuadrados de 1 m x 1 m distribuidos aleatoriamente en los transectos de 5 m x 20 m. Toda la vegetación

teniendo como especies forestales la *Swietenia macrophylla* King, *Inga edulis* Mart, *Alcornoque* (*Benth.*), *Inga edulis* Mart, *Guazuma crinita* Mart, *Aspidosperma macrocarpon* Mart, se cortó a ras de suelo, se pesó la muestra total y una submuestra se colocó en bolsas de papel y se secó en una estufa de aire caliente a 75 °C durante 48 h hasta alcanzar un peso seco constante.

• **Biomasa seca (hojarasca).** – La capa de

hojarasca y otros residuos (ramillas, ramas) se cuantificaron utilizando cuadrados de 0,5 m x 0,5 m colocados dentro de cada uno de los cuadrados de 1 m x 1 m. Toda la hojarasca se colocó en bolsas y se registró su peso fresco total por 0,25 m². Se tomó una submuestra, se registró su peso y se secó en una estufa a 75 °C hasta alcanzar un peso seco constante de 0,5 m x 0,5 m para hojarasca.

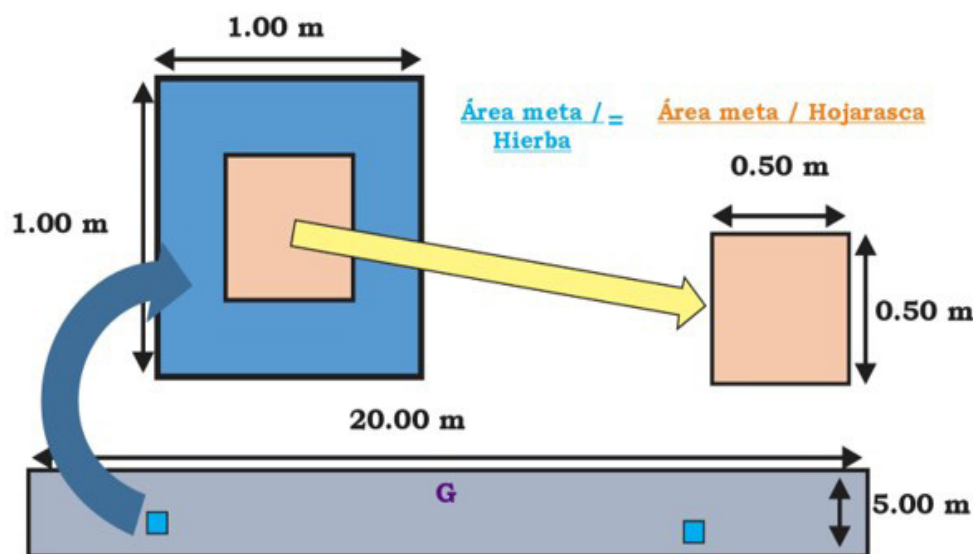


Figura 3. Cuadrantes de 1 m x 1 m para material herbáceo, arbustivo y cuadrantes interiores.

RESULTADOS

Contenido de carbono almacenado en el cultivo de cacao variedad CCN-51 bajo sistemas agroforestales de tres unidades fisiográficas diferentes

A través de la prueba de Shapiro Wilk aplicada a tres unidades fisiográficas se ha comprobado que los

datos tienen una distribución normal. De acuerdo con la Tabla 3 los valores de W^* están próximos a la unidad, lo que indica que los datos no presentan una desviación extrema respecto a la normalidad; esto se comprueba también mediante el p-valor ($> 0,05$).

Tabla 3. Prueba de normalidad de Shapiro Wilk para el contenido de carbono en cacao en tres unidades fisiográficas.

Unidad fisiográfica	Variedad	n	Media	D.E.	W^*	p-valor	CV (%)
Terraza baja	CCN-51	8	80,16	22,48	0,96	0,865	28,04
Terraza alta	CCN-51	8	75,12	21,91	0,95	0,855	25,55
Colina baja	CCN-51	8	47,65	14,34	0,95	0,759	30,11

En el mismo sentido, se aplicó la prueba de homocedasticidad, en la cual se obtuvo un valor de

0,259 ($> 0,05$) que indica que existe homogeneidad de varianza, por lo que se aplicó la prueba de T (Tabla 4).

Tabla 4. Prueba de T para la variable contenido de carbono en cacao en tres unidades fisiográficas (t/ha).

Unidad fisiográfica	Variedad	n	Media	Mínimo	Máximo	pHomVar	T	p-valor
Terraza baja	CCN-51	8	80,16	42,65	121,2			
Terraza alta	CCN-51	8	75,12	39,21	115,24	0,259	-3,45	0,0039
Colina baja	CCN-51	8	47,65	23,24	74,37			

El p-valor ($p < 0,05$) obtenido en la prueba de T indica que existe diferencia estadística significativa entre los niveles de carbono almacenado en cacao en las tres unidades fisiográficas.

La Tabla 4 muestra una mayor predominancia de carbono almacenado en el cultivo de cacao, variedad CCN-51, en la Terraza baja (Tb), donde se registró un valor máximo de 121,20 t/ha y un promedio de 80,16 t/ha. Le sigue la Terraza alta (Ta), con un valor

máximo de 115,24 t/ha y una media de 75,12 t/ha. En contraste, la Colina baja (Cb) presentó valores significativamente menores, con un máximo de 74,37 t/ha y un promedio de 47,00 t/ha. Estos resultados evidencian diferencias marcadas en el almacenamiento de carbono entre las tres unidades fisiográficas evaluadas, tal como se detalla en la Tabla 4 y la Figura 3.

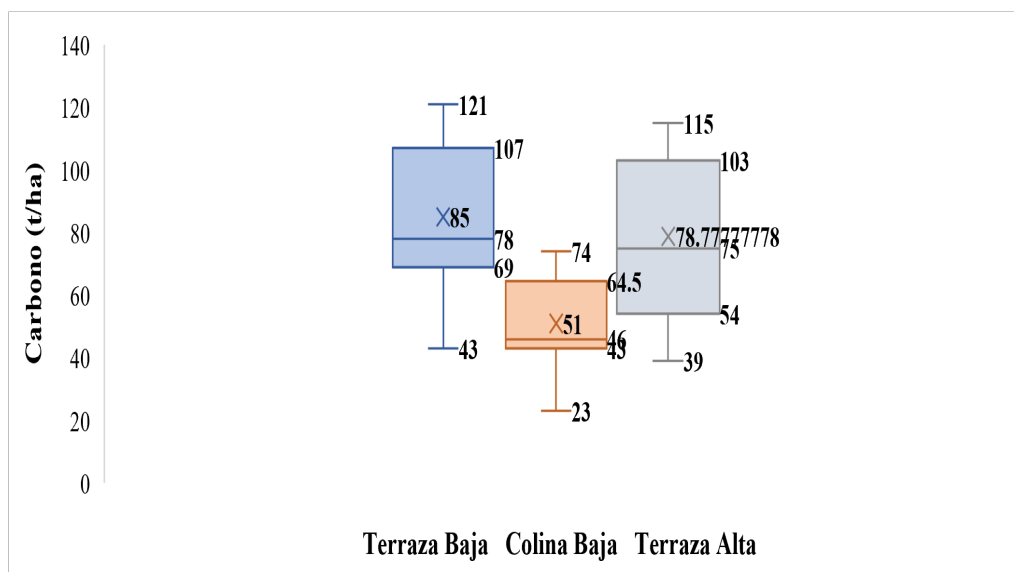


Figura 4. Diagrama de caja de carbono almacenado en cacao CCN-51 en tres unidades fisiográficas.

La Tabla 4 y la Figura 4 muestran el nivel de carbono almacenado en cacao en las unidades fisiográficas. La diferencia probablemente sea por el origen genético de su material vegetal, tiempo de instalación del cultivo y exposición al medio ambiente; estas

características junto con el aporte de residuos orgánicos característico de los SAF, regulan la acumulación de la materia orgánica y del carbono del suelo.

Carbono almacenado de las plantas de cacao CCN-51, especies arbóreas, herbáceas y hojarasca de los tres sistemas agroforestales de cacao en unidades fisiográficas diferentes

Tabla 5. Prueba de normalidad de Shapiro Wilk para el carbono almacenado por componente vegetal en tres unidades fisiográficas de Luyando

C por especies (n/ha)	Unidad fisiográfica	n	Media	D.E.
Forestales	Terraza baja	8	87,75	40,64
	Terraza alta	8	76,35	35,26
	Colina baja	8	9,29	7,05
Plátano	Terraza baja	8	1,28	0,86
	Terraza alta	8	1,17	0,73
	Colina baja	8	0,83	0,51
Cacao	Terraza baja	8	80,16	22,48
	Terraza alta	8	62,23	19,24
	Colina baja	8	47,65	14,34
Herbáceas	Terraza baja	8	0,26	0,26
	Terraza alta	8	0,32	0,25
	Colina baja	8	0,45	0,21
Hojarasca	Terraza baja	8	2,47	1,3
	Terraza alta	8	2,35	1,31
	Colina baja	8	2,01	1,25
Radicular	Terraza baja	8	0,9	0,17
	Terraza alta	8	0,9	0,16
	Colina baja	8	0,88	0,48

En la Tabla 5 se muestra la prueba de Shapiro Wilk aplicada a tres unidades fisiográficas en los distintos componentes del sistema agroforestal. De acuerdo al p-valor > 0,05 en la mayoría de los casos, los datos presentan una distribución normal, a excepción del

contenido de carbono almacenado en las herbáceas, por lo que posteriormente se aplicó la prueba de homocedasticidad y la prueba T (paramétrica) o Wilcoxon (no paramétrica).

Tabla 6. Prueba de T y de Wilcoxon para el valor de carbono en los componentes vegetales en tres unidades fisiográficas en Luyando.

C por especies (tn/ha)	Unidad fisiográfica	N	Media	Mínimo	Máximo	pH om Var	Valor	p-valor
Forestales	Terraza baja	8	87,75	9,28	144,78			
	Terraza alta	8	76,35	10,22	132,12	0,0001	*39,00	0,001
	Colina baja	8	9,29	0,58	22,9			
Plátano	Terraza baja	8	1,28	0,11	2,13			
	Terraza alta	8	1,17	0,1	1,98	0,2922	**0,09	0,934
	Colina baja	8	0,83	0,25	1,69			
Cacao	Terraza baja	8	80,16	4,65	121,2			
	Terraza alta	8	62,23	37,45	101,23	0,259	**0,45	0,003
	Colina baja	8	47,65	23,24	74,37			
Herbáceas	Terraza baja	8	0,26	0,09	0,87			
	Terraza alta	8	0,32	0,03	0,81	0,5232	*86,00	0,065
	Colina baja	8	0,45	0,2	0,76			
Hojarasca	Terraza baja	8	2,47	0,63	4,91			
	Terraza alta	8	2,35	0,73	3,21	0,985	**0,71	0,488
	Colina baja	8	2,01	0,81	4,56			
Radicular	Terraza baja	8	0,9	0,6	1,18			
	Terraza alta	8	0,9	0,3	1,13	0,0135	*60,00	0,442
	Colina baja	8	0,88	0,4	1,73			

En la Tabla 6 se presenta la prueba de homocedasticidad y el p-valor mediante la prueba de T si $p_{HomVar} > 0,05$; y la prueba de Wilcoxon si $p_{HomVar} < 0,05$. De acuerdo al p-valor, se ha encontrado diferencia estadística significativa en el carbono almacenado en las especies forestales y en el cacao entre las tres unidades fisiográficas.

Respecto al carbono en las especies forestales, se tiene que el máximo nivel se encuentra en la Terraza baja (Tb) con una media de 87,75 t/ha y Terraza alta (Ta) con media de 76,35 t/ha mientras que en la Colina baja (Cb) se calculó una media de 9,29 t/ha. En el cultivo de plátano se determinó mayor valor en la Terraza baja (Tb) con una media de 1,28 t/ha y Terraza alta (Ta) con media de 1,17 t/ha mientras que en Colina baja (Cb) el valor fue de 0,83 t/ha. En la variable carbono en cacao, se calculó mayor nivel en la Terraza baja (Tb), con una media de 80,16 t/ha

y Terraza alta (Ta) con media de 62,23 t/ha mientras que en la Colina baja (Cb) el cálculo de la media fue de 47,65 t/ha. Para el contenido de carbono en las herbáceas y arbustos el mayor valor se ha registrado en la Colina baja (Cb), con una media de 0,45 t/ha y Terraza alta (Ta) con media de 0,32 t/ha mientras que en la Terraza baja (Tb) se reporta una media de 0,26 t/ha.

En cuanto al carbono en la hojarasca, se encontró un máximo de almacenamiento en Terraza baja (Tb) con una media de 2,47 t/ha y Terraza alta (Ta) con media de 2,35 t/ha mientras que, por el contrario, la menor media se registró en Colina baja (Cb), con un valor de 2,01 t/ha. Por último, el máximo nivel promedio de carbono en las raíces se calculó en Terraza baja (Tb) y Terraza alta (Ta) una media de 0,90 t/ha respectivamente y mientras que el menor promedio fue de 0,88 t/ha calculado en Colina baja.

Tabla 7. Carbono almacenado (t/ha) en los diferentes componentes del sistema agroforestal.

Unidad fisiográfica	Componentes	Especies	Biomasa (tn/ha)	Carbono (tn/ha)	BV SAF (tn/ha)	Carbono vegetal SAF (tn/ha)
Terraza baja	Forestal	Caoba	183,63	82,63	509,95	229,48
		Shimbillo	137,29	61,78		
		Plátano	2,85	1,28		
	cultivo agrícola	Cacao	178,13	80,16		
	Herbáceas, arbustos	Herbáceas-arbustivas	0,58	0,26		
	Hojarasca radicular	Hojarasca	5,48	2,47		
		Radicular	1,99	0,9		
		Bolaina	100,21	82,63		
	Forestal	Capirona	98,56	61,78		
Guaba		54,21	82,63			
Pumaquiro		38,54	61,78			
Plátano		2,85	1,28			
Cacao		178,13	80,16			
Terraza baja	Herbáceas, arbustos	Herbáceas-arbustivas	0,58	0,26		
	Hojarasca radicular	Hojarasca	5,48	2,47		
		Radicular	1,99	0,9		
		Bolaina	33,87	15,24		
	Forestal	Capirona	10,28	4,63		
		Guaba	11,22	5,05		
		Pumaquiro	11,07	4,98		
	cultivo agrícola	Plátano	1,85	0,83	181,58	81,72
		Cacao	105,87	47,65		
	Colina baja	Herbáceas, arbustos	Herbáceas-arbustivas	1,00	0,45	
Hojarasca radicular		Hojarasca	4,48	2,02		
		Radicular	1,94	0,87		

Tabla 8. Prueba T para muestras independientes en las variables del suelo.

Variable	Terraza	n	Media	D.E.	W*	p-valor	(CV)%
Carbono en el suelo (t/ha)	Terraza baja	8	157,87	36,24	0,91	0,4635	20,33
	Terraza alta	8	137,47	31,2	0,90	0,4612	20,57
	Colina baja	8	83,93	17,07	0,84	0,1053	22,96
Densidad aparente del suelo (g/cc)	Terraza baja	8	1,32	0,05	0,94	0,7399	4,16
	Terraza alta	8	1,31	0,05	0,94	0,7355	4,11
	Colina baja	8	1,26	0,04	0,96	0,8713	3,43
Peso del volumen del suelo t/ha)	Terraza baja	8	1321,08	54,34	0,95	0,7966	4,11
	Terraza alta	8	1305,65	49,98	0,95	0,7722	4,05
	Colina baja	8	1264,62	42,39	0,95	0,7695	3,35

En la unidad fisiográfica de Terraza baja se ha encontrado mucho mayor carbono almacenado en comparación con la Colina baja (157,87 t/ha y 83,93 t/ha, respectivamente) y menor materia orgánica (1,786 %) que en esta última (2,068 %). Esta diferencia de niveles puede deberse principalmente a que en la Terraza baja se encuentran árboles forestales de mayor edad y diámetro, lo que contribuye a una mayor entrada de carbono al suelo por haber recibido más aportes de M.O a lo largo del tiempo; asimismo, el suelo tiende a ser más profundo y con mayor capacidad de retención de humedad, lo cual favorece a la acumulación de carbono en el suelo.

Se observaron diferencias estadísticas en la densidad del suelo entre las fisiografías estudiadas (Tabla 9), siendo la Terraza baja (Tb) la que presentó los mejores resultados en cuanto a densidad aparente y carbono. Por lo tanto, la densidad aparente es un atributo clave para el secuestro de carbono, ya que influye en el espacio poroso y la cantidad de partículas de arcilla y limo, que definen el área disponible para la fijación y captación de carbono. La acumulación de materia orgánica está vinculada no

no solo al secuestro de carbono, sino también a la mejora de las características del suelo, lo que facilita un aumento de las tasas de fijación y absorción de carbono.

Asimismo, ante lo manifestado en el párrafo anterior se puede atribuir también que la densidad en las fisiografías es muy similar ($Tb=1,32$ g/cc y $Cb = 1,26$ g/cc) las cuales corresponden a un suelo Franco arcilloso y Arcilloso, respectivamente. Se recalca que la mayor cantidad de carbono en la Terraza baja quizá se deba a que en esta fisiografía la plantación tiene más años de instalada. Esto pone en relevancia a las prácticas agrícolas llevadas a cabo en el estrato superficial del suelo, ya que estas afectan la acumulación de residuos vegetales y el crecimiento de las raíces de las plantas, optimizando las condiciones edáficas para el almacenamiento de carbono derivada de la biomasa y el intercambio de gases.

Por último, en la Tabla 9 se presenta el total de carbono almacenado en cada unidad fisiográfica objeto de la investigación.

Tabla 9. Carbono almacenado total por unidad fisiográfica.

Unidad fisiográfica	Carbono vegetal (tn/ha)	Carbono del suelo (tn/ha)	Carbono total SAF (tn/ha)
Terraza baja	229,48	57,87 +- 36,24	387,35 +- 36,24
Terraza alta	157,32	131,47 +- 36,24	294,79 +- 36,25
Colina baja	81,72	83,93 +- 36,24	165,65 +- 36,24

Según los datos expuestos, el indicador carbono del suelo (tn/a) fue de 229,48; respecto del carbono del suelo (tn/a) se encuentra 57,87 +- 36,24; finalmente el carbono total SAF (tn/ha) representa el valor de a 387,35 +- 36,24. Por otro lado, respecto del carbono

vegetal (tn/ha) es equivalente a 81,72; respecto del carbono de suelo (tn/a) equivalente a 83,93 +- 36,24; finalmente el carbono total SAF es equivalente a 165,65 +- 36,24 mostrado en la tabla 9.

DISCUSIÓN

Respecto del contenido de carbono almacenado en el cultivo de cacao variedad CCN-51 existen diferencias marcadas en el almacenamiento de carbono entre las tres unidades fisiográficas, esto puede deberse a la variabilidad de las zonas de estudio, además de la calidad de los lugares donde se situaron las tres plantaciones o la calidad genética del material vegetal. El desarrollo y la calidad son influenciados por la relación entre las características genéticas, del ambiente por la competencia por recursos y la gestión de la plantación. Esto concuerda

con lo observado por Concha et al. (2007) al indicar que la retención de carbono no depende de la antigüedad de los sistemas, sino de la variedad de especies presentes en cada uno, así como de las técnicas de silvicultura y del manejo apropiado de la plantación.

Resultados opuestos a lo observado en la Tabla 4 fueron verificados por Mesías- Gallo et al. (2018) que, en suelos con clima tropical, no se registra un nivel elevado de almacenamiento de carbono, a diferencia de lo que se encontró en las zonas altas del área de su estudio, donde se presentan suelos bajo bosques primarios o secundarios que superan los valores de almacenamiento de carbono. Los autores indican que

esto sucede por varias razones; en primer lugar, se trata de suelos jóvenes, formados por sedimentos aluviales recientes, que, a pesar de estar en áreas tropicales, no almacenan grandes cantidades de almacenamiento de carbono. Además, son suelos con características aluviales, con capas de arena en las secciones superior y media del perfil, lo que impide de manera sistemática y continua la captura de carbono en el suelo y resultando en un menor contenido de carbono en comparación con los que se encuentran bajo bosques. En el presente estudio el mayor contenido de carbono en el suelo y mayor contenido de carbono en el cultivo de cacao pertenecen a la Terraza baja (Tb), lo que probablemente se debe al tiempo de instalación del cultivo.

Luna et.al (2025) se centraron en estudiar el contenido de carbono orgánico en diferentes profundidades de dos tipos de sistemas de uso como son un ecosistema natural y una finca dedicada al cultivo de cacao. Se recolectaron muestras de suelo en los puntos previamente seleccionados, las cuales fueron trasladadas al laboratorio para su análisis mediante el método de Bouyoucos, este es basado en el principio de sedimentación, permite determinar la textura del suelo al establecer las proporciones de arena, limo y arcilla presentes. En el ecosistema natural (bosque siempreverde), el contenido de COS a una profundidad de 0-15 cm es notablemente más alto, alcanzando el 41,76%, aumentando al 42,20% a una profundidad de 15-30 cm. Por el contrario, en la zona agrícola de cacao, los niveles de COS disminuyen del 41,92% a una profundidad de 0-15 cm al 39,56% a una profundidad de 15-30 cm. Estos hallazgos subrayan la influencia de la profundidad y el tipo de uso del suelo en la distribución del carbono orgánico, El ecosistema natural presenta una capacidad superior de almacenamiento de carbono orgánico, debido a las condiciones naturales propicias que promueven la fertilidad del suelo y su productividad.

Por otro lado, el carbono almacenado de las plantas de cacao CCN-51, especies arbóreas, herbáceas y hojarasca de los tres sistemas agroforestales de cacao se alude que se ha encontrado diferencia estadística significativa en el carbono almacenado en las especies forestales y en el cacao entre las tres unidades fisiográficas; no obstante, dichas estimaciones de captura de carbono en biomasa varían debido a que el contenido de carbono difiere según la especie arbórea y el tipo de tejido (Francis, 2000; Gifford, 2000). Es importante medir los depósitos de carbono que la mayoría de los estudios no estiman: biomasa subterránea, madera muerta sobre el suelo y mantillo (Bolaños et.al, 2017). Para proyectos de captura de carbono, Gayoso & Guerra (2005) enfatizan la cuantificación del carbono con base en datos específicos de cada especie, ya que esta información biológica impacta significativamente la cantidad de carbono secuestrado.

Resultados semejantes fueron observados por Dávila (2023) al encontrar diferencias estadísticas altamente significativas al estudiar el almacenamiento de COS de las unidades fisiográficas (Terrazas alta, media, baja y baja no inundable) del fundo CIPTALD – Tulumayo. El autor atribuye a que el uso del suelo afecta de forma significativa en la captura de carbono de cada tipo fisiográfico.

Los resultados de carbono en el suelo superan a lo reportado por Dávila (2023), quien al estudiar los niveles de carbono en distintas terrazas encontró valores entre 20,92 y 32,01 tC/ha, determinando mayor C en la Terraza media. Asimismo, Zavala et al. (2018), obtuvieron resultados inferiores a lo mostrado en la presente investigación, determinando 66,16 tC/ha en el suelo del SAF menor a 8 años y 59,08 tC/ha en el suelo del SAF mayor a 16 años. Los sistemas agroforestales (SAF) jóvenes almacenan más carbono en el suelo que los SAF maduros debido a la mayor acumulación de biomasa proveniente de la hojarasca. Esto permite una mayor capacidad de almacenamiento de carbono en el suelo. Salazar et al. (2018) confirmaron esto, reportando que un SAF con café de 3-5 años almacenó 224,26 t/ha de carbono, mientras que uno de 8-10 años almacenó 195,5 t/ha. Estas diferencias se deben a diversos factores, además el cambio de uso del suelo de un bosque natural a plantación asociada genera una acumulación de material orgánico cuya biomasa influye en el contenido de carbono del suelo.

Barrezueta et al. (2018) encontraron densidades aparentes similares (1,37 g/m³) en suelos cultivados con cacao fino de aroma (Franco arenosos) y el clon CCN 51 (Franco limosos) en la provincia El Oro, Ecuador, en comparación con los resultados expuestos el cual se señala una densidad de Tb=1,32 g/cc y Cb = 1,26 g/cc. Alvarado y Forsythe (2005) señalan que valores inferiores a 1,9 g/cc favorecen el desarrollo radicular y reducen la compactación y erosión, por lo que refuerza la ventaja de poseer dichos indicadores en el estudio propuesto.

En concordancia, Gutiérrez y Levano (2023) observaron mayor densidad aparente en monocultivos de cacao (1,44 g/cm³) que en sistemas agroforestales con pino chuncho (1,25 g/cm³) en Luyando, atribuyendo la diferencia al manejo del suelo. Resultados similares fueron reportados por Cerda (2008), quien encontró una densidad de 0,9 g/cm³ en cacao de monocultivo y 0,83 g/cm³ en cacao con laurel, y por Koicheoski (2022), quien encontró 1,04 g/cm³ en sistemas agroforestales de cacao.

En la última variable, peso del volumen del suelo, se obtuvieron resultados ligeramente superiores a lo reportado por Pérez (2023), quien determinó una media de 1 116,45 t/ha y 1 046,69 t/ha en SAF's de 12 y 8 años, respectivamente.

En la investigación de Ramírez (2025) presenta el total de carbono almacenado de dos unidades

fisiográficas delimitadas con parcelas en Vista Alegre de Chía (planicie) y Nueva Bellavista (colina); de lo susodicho el autor alude que respecto de la terraza baja no inundable (Tb2) el carbono vegetal (tn/ha) equivale a 172,82 mientras que en el estudio fue de 229,48; respecto del carbono del suelo (tn/a) el autor señala una equivalencia de 157,87 mientras que en el estudio se encuentra 57,87 $\pm$ 36,24 siendo alta la brecha; finalmente el carbono total SAF (tn/ha) representa el valor de 330,69 en compaginación con el resultado de la tabla 9 el cual equivale a 387,35 $\pm$ 36,24. Por otro lado el autor también realizó el análisis sobre la baje del sistema agroforestal colina baja, en la que señala que el carbono vegetal (tn/ha) es de 61,11 en compaginación con los resultados el cual equivale a 81,72 lo cual corrobora que los datos son parecidos con disidencia geográfica; respecto del carbono de suelo (tn/a) el autor denota el valor de 83,93 en comparación con 83,93 $\pm$ 36,24, el cual refleja cierta similitud; finalmente el carbono total SAF es equivalente a 145,04 respecto de 165,65 $\pm$ 36,24 mostrado en la tabla 9.

CONCLUSIONES

Las mayores acumulaciones de carbono orgánico en el suelo ocurren en zonas de cultivo con sombra, especialmente en los primeros 5 cm del perfil del suelo. Esto se debe principalmente al aporte de biomasa radicular y a los residuos vegetales que dejan las prácticas culturales propias del manejo del cacao. El sistema cacaotero con mayor acumulación de biomasa total se encontró en las especies de Caoba componente forestal introspectivos de la unidad fisiográfica Terraza baja. La cantidad de carbono almacenada en los árboles es mayor en Caoba y Bolaina componente forestal introspectivos de la unidad fisiográfica Terraza baja. La mayor cantidad y proporción del carbono vegetal está en las raíces de los árboles del bosque seco cuyo componente forestal tiene como especie representativa la guaba. La más baja acumulación de Carbono se encuentra en la hojarasca, en las tres zonas de vida.

En el agroecosistema cacaotero se evidencia que el tallo y la raíz son el mayor almacenamiento de carbono de los árboles, considerándose como estructuras permanentes de fijación de carbono. Por lo que se puede establecer al cacaotero como un componente agrícola sumidero y fijador de carbono.

La mayor tasa de acumulación de carbono ocurre hasta los 15 años del cultivo.

REFERENCIAS

- Alvarado, A., & Forsythe, W. (2005). Variaciones de la densidad aparente en órdenes de suelos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 29 (1), 85–94. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6312831>
- Barrezueta, U. S., Luna-Romero, E. & Barrera-León, J. (2018). Almacenamiento del carbono en varios suelos cultivados con cacao en la provincia El Oro-Ecuador. *Revista Científica Agroecosistemas*, 6(1), 154-161. <https://aes.ucf.edu.cu/index.php/aes/article/view/177>
- Bolaños González, Y., Bolaños González, M., Paz Pellat, F., & Ponce Pulido, J. (2017). Estimación de carbono almacenado en bosques de oyamel y ciprés en Texcoco, Estado de México. *Terra Latinoamericana*, 35(1), 73–86. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792017000100073&lng=es&tling=es
- Cerda, R. (2008). *Calidad de suelos en plantaciones de Cacao (Theobroma cacao L.), banano (Musa AAA) y Plátano (Musa AAB) en el Valle de Talamanca, Costa Rica* [Tesis de maestría, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza]. Repositorio Institucional. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/5551>
- Concha, J., Alegre, J. & Pocomucha, V. (2007). Determinación de las reservas de carbono en la biomasa aérea de sistemas agroforestales de Theobroma cacao L. en el departamento de San Martín, Perú. *Ecología Aplicada*, 6, 75–82. <http://www.scielo.org.pe/pdf/ecol/v6n1-2/a09v6n1-2.pdf>
- Dávila, V. (2023). *Almacenamiento de carbono en el suelo de las unidades fisiográficas del fundo CIP-TALD– Tulumayo, Tingo María – Huánuco*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional Agraria de la Selva. <https://hdl.handle.net/20.500.14292/2339>
- Francis, J. K. (2000). Estimating biomass and carbon content of saplings in Puerto Rican secondary forests. *Caribbean journal of science*, 36(3–4), 346–350. <https://research.fs.usda.gov/treesearch/30106>
- Gayoso A., J., & Guerra C., J. (2005). *Carbon content in the above-ground biomass of evergreen forest in Chile. Bosque*, 26(2), 33–38. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002005000200005>
- Gifford, R. (2000). Carbon contents of aboveground tissues of forest and woodland trees (National Carbon Accounting System Technical Report No. 22).. Australian Greenhouse Office. <https://www.dcceew.gov.au/themes/custom/awe/fullcam/Help-FullCAM2024/refs/TR22%20Carbon%20Contents%20of%20Above-Ground%20Tissues%20of%20Forest%20and%20Woodland%20Trees.pdf>
- González, M., Carvajal, J., Núñez, J., & Marinero, E. (2023). Factores determinantes en las emisiones de CO2 en Colombia originados por la explotación del carbón. *Revista Iberoamericana de Bioeconomía y Cambio Climático*, (9)17, 2107–2117. <https://doi.org/10.5377/ribcc.v9i17.15496>
- Gutierrez, T. L. V. & Levano, C.J.D. (2023). Efecto de sistemas agroforestales y monocultivo de cacao (*Theobroma cacao L.*), en los indicadores físico del suelo. *Revista de Investigación y Amazonia*, 13(16), 33–41 <https://doi.org/10.69507/revia.5.13.16.312>

- Hernández Núñez, H. E., Andrade, H. J., Suárez Salazar, J. C., Sánchez A., J. R., Gutiérrez S., D. R., Gutiérrez García, G. A., Trujillo Trujillo, E., & Casanoves, F. (2021). Carbon storage in agroforestry systems in Colombia's Eastern Plains. *Revista de Biología Tropical*, 69(1), 352–368. <https://doi.org/10.15517/rbt.v69i1.42959>
- Koicheoski Hipolito, R. J. (2022). *Evaluación de la calidad del suelo en cuatro sistemas de uso (cacao, plátano, café y purma) ubicados en el caserío Los Cedros, distrito José Crespo y Castillo* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional Agraria de la Selva. <https://hdl.handle.net/20.500.14292/2371>
- Lapeyre, T., Alegre, J. C. & Arévalo, L. (2004). *Determinación de las reservas totales de carbono en los diferentes sistemas de uso de la tierra*. World Agroforestry Centre & CODESU. <https://www.cifor-icraf.org/es/conocimiento/publicacion/27681/>
- Luna Florin, A. D., Chalaco Álvarez, P. N., Poma Luna, D. A., Reyes Cabrera, K. V., Giron Pucha, B. L., & Zambrano Morales, R. A. (2025). Almacenamiento y distribución de carbono orgánico en suelos de bosque natural y sistemas agrícolas de cacao en Palenque, Pasaje-Ecuador. *Ciencia y Tecnología*, 18(1), 71–81. <https://doi.org/10.18779/cyt.v18i1.838>
- Marcelo, F., Mantilla, W., Baselly, R., Vargas, J., & Pajares, U. (2023). Uso potencial de *Eucalyptus viminalis* Labill. para la captura de carbono en un sistema silvopastoril, Perú. *Colombia forestal*, 26(1), 64–78. <https://doi.org/10.14483/2256201X.19043>
- Mesías-Gallo, F. W., Hernández-Jiménez, A., Vera-Macías, L. R., Guzmán-Cedeño, Á. M., Cedeño-Sacón, Á. F., Ormaza-Cedeño, K. P., y López-Alava, G. A. (2018). Reservas de carbono orgánico en suelos de la llanura fluvial Calceta-Tosagua, Manabí, Ecuador. *Cultivos Tropicales*, 39(4), 27–33. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362018000400004&lng=es&tng=es
- Pérez, M. V. (2023). *Efecto de la variedad y edad del cultivo de (café) Coffea arabica L. en el carbono almacenado y los servicios ecosistémicos de SAF's en la zona de La Divisoria*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio institucional Universidad Nacional Agraria de la Selva. <https://repositorio.unas.edu.pe/items/f52b2f93-c553-42fe-8448-b8695bf618e2>
- Ramirez Santiago D. L. (2025). *Almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales de Theobroma cacao (cacao aromático) en dos unidades fisiográficas*. [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. <https://hdl.handle.net/20.500.14292/3449>
- Rügnitz, M. T., Chacón, M. L., & Porro R. (2009). *Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales*. World Agroforestry Centre (ICRAF) & Consorcio Iniciativa Amazónica (IA). <https://www.cifor-icraf.org/publications/downloads/Publications/PDFS/B16293.pdf>
- Salazar, A., Saucedo, J., & Méndez, L. (2018). Evaluación de la captura de carbono en suelos de sistemas agroforestales con café (*Coffea arabica* L.) en los distritos Mariscal Benavides y Longar, provincia Rodríguez de Mendoza, departamento de Amazonas. *Revista de Investigación Científica UNTRM: Ciencias Naturales e Ingeniería*, 1(1) 20–26. <http://dx.doi.org/10.25127/ucni.v1i1.261>
- Siqueira, C., Chiba, M., Moreira, R., & Abdo, M. (2020). Carbon stocks of a degraded soil recovered with agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, 94(3), 1059–1069. <https://doi.org/10.1007/s10457-019-00470-9>
- Zavala Solórzano, J. W., Zavala Guerrero, S. L. & Mansilla, Minaya L. G. (2018). Estimación de la biomasa y carbono almacenado en un sistema agroforestal del cafetal de la Universidad Nacional Agraria de la Selva. *Revista de Investigación y Amazonía*, 8(5), 1–8. <https://revistas.unas.edu.pe/index.php/revia/article/view/200>

Correspondencia:

José Luis Huaynates Natividad
correo: jose.levano@unas.edu.pe ✉

José Dolores Lévano Crisóstomo
correo: jose.levano@unas.edu.pe ✉

Jaime Torres García
correo: jaime.torres@unas.edu.pe ✉

Conflicto de intereses:

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

Contribución del autor:

Según la investigación, el manuscrito es un artículo de investigación original: el cual posee investigaciones inéditas que aporten nuevos conocimientos. El artículo de investigación original presenta resultados originales derivados de investigación científica y están sustentadas adecuadamente con el marco teórico, la metodología y la discusión mediante fuentes académicas confiables y verificables, preferentemente evaluadas por pares. Se priorizó la literatura reciente y relevante para el objeto de estudio; asimismo, se incluye estudios empíricos, experimentales, observacionales, de modelización o análisis aplicado, respecto de la naturaleza del estudio.

El número de referencias incluidas en el cuerpo principal del manuscrito es de 23 referencias bibliográficas.

Contribuciones realizadas por el Ing. José Luis Huaynates Natividad es investigación (incluye trabajo de campo y/o laboratorio); asimismo metodología (diseño experimental, protocolos, materiales y métodos) y redacción- borrador original (incluye resultados, discusión y conclusiones). Asimismo, se cuenta con evidencias verificables ya sea base de datos, cuaderno de campo o archivos originales; finalmente documentación metodológica o técnica.

Contribuciones realizadas por el Doc. José Dolores Lévano Crisóstomo es supervisión o asesor del artículo. Asimismo, se cuenta con evidencias verificables ya sea registros de revisión y edición del manuscrito.

Contribuciones realizadas por el Ing. Jaime Torres García es visualización (incluye generación de figuras, gráficos, mapas e imágenes). Asimismo, se cuenta con evidencias de versiones de borradores con control de cambios.

Fuente de Financiamiento:

El financiamiento fue propio.