

Almacenamiento y distribución de carbono orgánico en suelos de bosque natural y sistemas agrícolas de cacao en Palenque, Pasaje - Ecuador

Storage and distribution of organic carbon in two natural forest soils and agricultural systems of cacao land use systems in Palenque, Pasaje - Ecuador

Alex Dumany Luna Florin¹ , Priscila Nicole Chalaco Álvarez¹ , Darwin Amable Poma Luna¹ ,
Kenny Verónica Reyes Cabrera¹ , Brigitte Lisseth Giron Pucha¹ , Roy Alexander Zambrano Morales¹

¹Universidad Técnica de Machala, Carrera de Ingeniería Ambiental, Machala, Ecuador.

Autor de correspondencia: adluna@utmachala.edu.ec

Recibido: 01/03/2024. Aceptado: 12/12/2024

Publicado el 15 de enero de 2025

Resumen

El análisis comparativo del carbono orgánico del suelo (COS) en diferentes sistemas de uso, se basa en las características del suelo asociadas al manejo y conservación de los sistemas, el estudio se centró en conocer 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.

Palabras clave: retención, distribución, ecosistema, cambio, materia orgánica.

Abstract

The comparative analysis of soil organic carbon (COS) in different systems of use is based on the characteristics of the soil associated with the management and conservation of the systems, the study focused on knowing the organic carbon content at different depths in two types of systems of use such as a natural ecosystem and a farm dedicated to cocoa cultivation. Soil samples were collected at the previously selected points and taken to the laboratory for analysis using the Bouyoucos method, which is based on the principle of sedimentation and makes it possible to determine soil texture by establishing the proportions of sand, silt and clay present. In the natural ecosystem (evergreen forest), the COS content at a depth of 0-15 cm is notably higher, reaching 41,76%, increasing to 42,20% at a depth of 15-30 cm. In contrast, in the cocoa agricultural zone, COS levels decrease from 41,92% at a depth of 0-15 cm to 39,56% at a depth of 15-30 cm. These findings underline the influence of soil depth and type of soil use on the distribution of organic carbon. The natural ecosystem has a superior capacity for organic carbon storage, due to the natural conditions that promote soil fertility and productivity.

Keywords: retention, distribution, ecosystem, change, organic matter.

Introducción

El suelo es el mayor sumidero de carbono, es decir almacena aproximadamente dos veces más que la atmósfera y la vegetación (Robert, 2002). La mayor parte de sumideros de carbono, se encuentran en bosques de baja latitud, mientras que la mayoría de carbono del suelo, se encuentran en bosques siempre verdes de altas latitudes (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2017). La capacidad de sumidero de carbono orgánico (COS) de los suelos agrícolas en Ecuador y en el mundo puede afectar a las prácticas agropecuarias insostenibles que causan la pérdida del contenido de COS a causa de la degradación y erosión de los suelos (Loayza *et al.*, 2020).

Porta *et al.* (2013) manifiestan que es necesario tener en cuenta la idoneidad de sumidero de carbono orgánico de los suelos (COS) rurales en el Ecuador y generalmente en el mundo, ya que puede verse perjudicado por las prácticas agropecuarias insostenibles que ocasionan la pérdida de COS y por consiguiente la degradación y erosión de los suelos. La pérdida de COS afecta a la salud y productividad del suelo y agrava el cambio climático (Vásquez Polo y Macías Vázquez, 2017). La importancia radica en ver la pérdida de COS como indicador del grado de degradación del suelo, es decir, a mayor contenido de COS, la calidad y salud del suelo serán mayores frente a un suelo con bajo contenido de COS (Loayza *et al.*, 2020). Burbano-Orjuela (2016) sostiene que hay dos ciclos, que corresponden a el bioquímico a corto plazo y otro geoquímico a largo plazo, pero las actividades antropogénicas alteran y dañan estos dos ciclos, y aquí, nos concentramos en una de las reservas que cumple el COS (Burbano Orjuela, 2018).

La discusión sobre el cambio de uso de suelos por zonas agrícolas y sus consecuencias en el ciclo biogeoquímico del carbono es esencial para comprender la complejidad de los ecosistemas, especialmente en ecosistemas de bosques siempre verdes y áreas de cultivos. Ayala-Niño *et al.* (2018) destaca la importancia del carbono en el soporte de raíces y la provisión de nutrientes, subrayando su papel fundamental en la sostenibilidad de estos ecosistemas.

En este sentido, la afirmación de Rippstein (2001) acerca de la esencialidad del carbono para las actividades del suelo refuerza la relevancia de este elemento en la dinámica de los ecosistemas. Que los bosques siempreverdes y las zonas de cultivos agrícolas cambien la formación vegetal y en la masa foliar destaca la complejidad de las interacciones en juego.

No obstante, es crucial ahondar en la comprensión de cómo estos cambios afectan directamente la capacidad de sostenimiento y retención de nutrientes del suelo. La interacción entre las fases de formación y los diferentes factores ambientales que influyen en el ciclo biogeoquímico del carbono debe ser analizada en detalle para evaluar las consecuencias a largo plazo. Además, sería pertinente explorar cómo estos cambios en la vegetación y en el ciclo del

carbono impactan en la biodiversidad local y en la resiliencia del ecosistema. La identificación de estrategias de manejo sostenible que minimicen los efectos adversos del cambio de uso de suelos en estas áreas es crucial para preservar la funcionalidad de los bosques siempreverdes y garantizar la continuidad de los servicios ecosistémicos que proporcionan, la comprensión detallada de las interacciones entre el cambio de uso de suelos, el ciclo biogeoquímico del carbono y la dinámica de los ecosistemas es esencial para desarrollar estrategias de conservación efectivas.

La FAO (2020b) manifiesta que el cambio de suelo es un proceso que va en ascenso, la transformación entre estos cambios de ecosistemas naturales y zonas agrícolas representando el 10% de las emisiones antropogénicas actuales del gas efecto invernadero y con una captación de 20 Pg. C (Duarte *et al.*, 2006).

El carbono orgánico regula las funciones físicas, químicas y biológicas del suelo para mantener su fertilidad y productividad. Es un insumo fundamental para monitorear el ciclo del carbono bajo escenarios de cambio de uso de la tierra, por lo que los suelos se consideran un componente básico en el control del cambio climático, ya que en función de su uso pueden convertirse en fuentes o sumideros de carbono atmosférico (Vargas-Larreta *et al.*, 2022).

El estudio del COS del suelo en un ecosistema bosque siempreverde y en la zona de producción agrícola es importante para entender cómo funcionan y cómo podemos utilizarlos de manera sostenible protegiendo la biodiversidad y la gestión del agua (Miller y Leon Rodriguez, 1994). El conocimiento de las características y propiedades de los suelos húmedos de ecosistema siempreverde es fundamental para el desarrollo de las prácticas agrícolas sostenibles, la protección de la biodiversidad y la gestión adecuada del agua en los ecosistemas terrestres.

La presente investigación tiene como objetivo cuantificar el almacenamiento de COS en un ecosistema de bosque siempreverde y una finca cultivada con cacao en el Cantón Pasaje, mediante el análisis de la profundidad de suelo y comparación con las características físico- químicas, resultados que permitirán establecer mejores programas con medidas para la conservación y equilibrio del suelo y su ecosistema. Para analizar la relación entre el carbono orgánico del suelo (COS) y los parámetros fisicoquímicos, considerando la variabilidad en profundidad y tipo de suelo. Este estudio permitirá comprender cómo el COS influye en los parámetros y cómo estos, a su vez, afectan la distribución y composición del COS, proporcionando información clave para la gestión sustentable de suelos.

Materiales y métodos

La zona de estudio se sitúa en el sitio “Campo Real” perteneciente, a la parroquia Palenque Cantón Pasaje en el sur del Ecuador (Figura 1). Este ecosistema, cuenta con una extensión total de 480 km² y su cabecera cantonal abarca 1 471 hectáreas, presenta una temperatura promedio anual de 25,3 °C, su clima es tropical, y su precipitación está en un rango de 1 689 mm, existen dos tipos de suelo vertisol y alfisol, esta y se encuentra rodeada de actividades productivas como el cacao, pastizales y banano (Gad Municipal de Pasaje, 2019).

Selección de coberturas de uso de suelo

Una vez identificada el área de estudio, se seleccionaron dos tipos de cobertura del suelo para tomar muestras como bosque natural y cultivo de cacao, tiene una gran variedad de árboles, arbustos y vegetación que, junto a los factores físicos (clima,

suelo, etc.) y biológicos (musgos, insectos, etc.) se relacionan creando un conjunto equilibrado en el entorno y con respecto al cultivo del cacao, este correspondió a una extensión de 5 hectáreas, con 15 años de establecimiento, cultivada con la variedad CCN51 bajo un manejo agroecológico sin la aplicación de insumos químicos.

Toma de muestras

Una vez seleccionados los puntos de muestreo (Tabla 1), se obtuvo muestras representativas en ambas áreas, tanto para el bosque siempreverde como en la plantación de cacao, tomando 8 puntos de muestreos a una distancia de 100 metros de punto a punto y en la cobertura de cacao, se tomaron 2 muestras a dos profundidades diferentes de 0-15 y de 15-30 cm, dando 32 muestras para todo el estudio. Estas muestras fueron recolectadas en 1 kg para luego ser secadas y tamizadas a en una malla de 2mm (Mendoza y Espinoza, 2017).

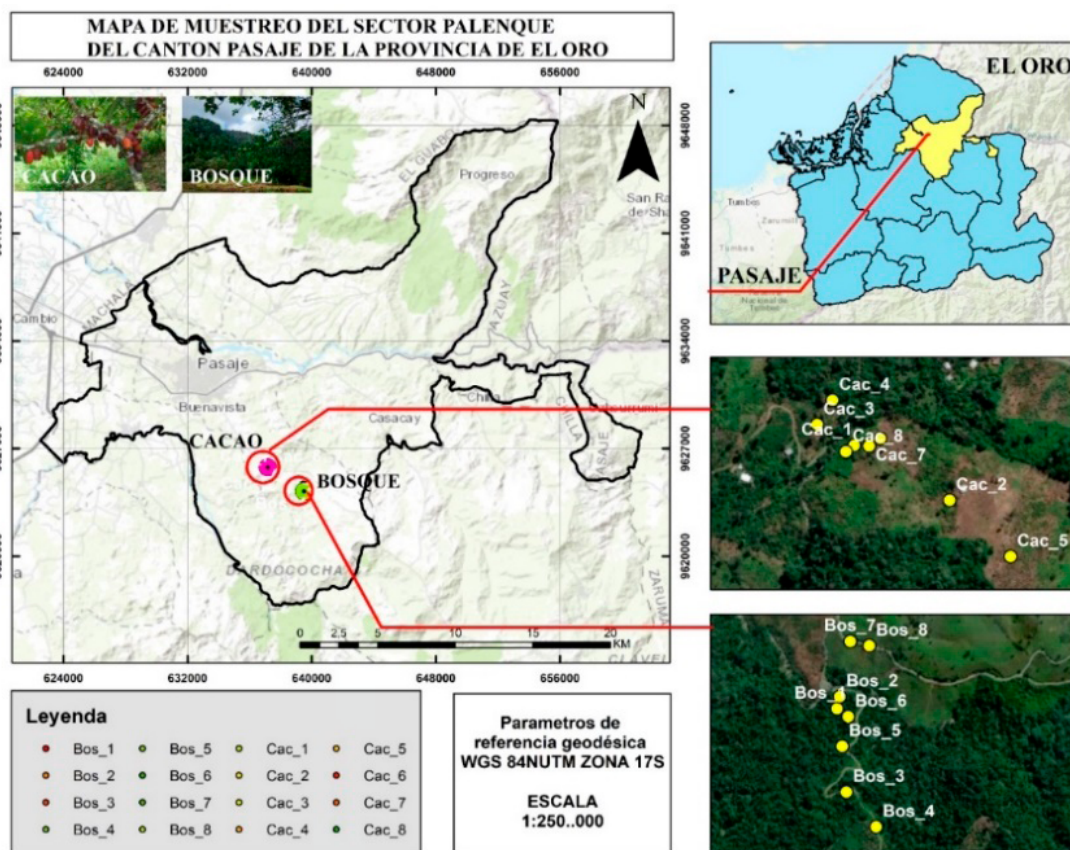


Figura 1. Localización de las áreas de estudio

Tabla 1. Coordenadas, ecosistema y orden de suelo de los puntos de estudio del sector Palenque, cantón Pasaje

Cantón	Altitud (msnm)	Cobertura	Código	Coordenadas (X)	Coordenadas (Y)	Orden de suelo
Pasaje	182m	Bosque	1	639412	9624521	Alfisol
Pasaje	149m	Bosque	2	639419	9624551	Alfisol
Pasaje	196m	Bosque	3	639435	9624313	Alfisol
Pasaje	221m	Bosque	4	639509	9624226	Alfisol
Pasaje	206m	Bosque	5	639425	9624427	Alfisol
Pasaje	176 m	Bosque	6	639440	9624501	Alfisol
Pasaje	200m	Bosque	7	639445	9624689	Alfisol
Pasaje	176m	Bosque	8	639492	9624678	Alfisol
Pasaje	156m	Cacao	1	637194	9625714	Inceptisol
Pasaje	93m	Cacao	2	637330	9625635	Inceptisol
Pasaje	74m	Cacao	3	637141	9625744	Inceptisol
Pasaje	72m	Cacao	4	637163	9625779	Inceptisol
Pasaje	75m	Cacao	5	637417	9625554	Inceptisol
Pasaje	68 m	Cacao	6	637231	9625724	Inceptisol
Pasaje	65m	Cacao	7	637215	9625713	Inceptisol
Pasaje	62m	Cacao	8	637182	9625705	Inceptisol

Análisis de los parámetros físicos y químicos

Con respecto a los análisis físicos-químicos, una vez obtenida las muestras fueron llevados al laboratorio de suelos de la facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Técnica de Machala, en donde se determinaron los parámetros físicos como la clase textural, densidad aparente, densidad real y porosidad. La clase textural se lo realizó utilizando el método de Bouyoucos; La densidad de la solución de sedimentación se determinó por un hidrómetro calibrado, que entrega directamente el contenido en porcentaje de la fracción de un diámetro. La densidad aparente se evaluó utilizando el método de la parafina, que implica sumergir el agregado cuidadosamente durante aproximadamente 3 segundos, permitiendo que se enfríe antes de proceder a pesarlo. En cuanto a la densidad real se lo determinó utilizando un balón aforado agregando la muestra de suelo y agua en el mismo hasta la línea de aforo para así poder moverlo y ser pesado, usando de este modo la ecuación de la porosidad = $(100 - (DA / DR) \cdot 100)$; fue obtenida mediante los datos de densidad aparente y densidad real tras la siguiente ecuación (Collazos, 1989).

$$\text{Porosidad} = 100 - \frac{DA}{DR} \times 100 \quad (1)$$

Parámetros químicos

En cuanto a los parámetros químicos, las variables fueron carbono, materia orgánica, pH y conductividad eléctrica, que se detallan a continuación y el método adecuado para

obtener sus datos. En el cálculo del COS se utilizó el método de ignición que consiste en tomar dos muestras (0-15 y 15-30) de 10g aproximadamente, para luego colocarlos en un crisol y registrar el peso de ambos de manera independiente, posteriormente se lo elevó a una temperatura de 600 °C, y finalmente se obtuvo la diferencia de estos, obteniendo así el porcentaje de carbono (%C), a través de la siguiente fórmula. se realizó multiplicando el peso del volumen por el COS del suelo por el porcentaje de carbono. Para el peso del volumen del suelo, ya después de haber obtenido los datos necesarios que se realizó el producto del peso del volumen del suelo y porcentaje del carbono teniendo así los siguientes resultados, para ello se utilizó la siguiente fórmula.

Al obtener los datos por el método adoptado, el cual fue de ignición, se determinó la materia orgánica con la ecuación que se muestra a continuación.

$$\%M. O. = \%C \cdot 1,724 \quad (2)$$

Con respecto al pH se determinó haciendo una relación de 1:5, una parte de suelo con 5 partes de agua destilada (H₂O), este proceso permitió también determinar la conductividad eléctrica de la siguiente manera, colocamos 15 gr de la muestra en un recipiente y le agregamos 75 ml de H₂O, mezclamos hasta dejar homogenizada la mezcla y esperamos un tiempo de 30 minutos como tiempo de reposos para luego hacer medidas con el pH metro y conductímetro el fin de proceder a tomar los resultados.

Análisis del contenido de carbono orgánico

Con el método de ignición se realizó el siguiente cálculo con los diferentes tipos de muestras (0-15 y 15-30) en las 2 coberturas:

$$PVs(\text{Mg. C. ha}^{-1}) = (PVs \times \%C) / 100 \quad (3)$$

Una vez calculado el volumen del suelo se procedió a calcular el COS a través de la siguiente ecuación.

$$\text{Cantidad de COS} = \left(\% \frac{C}{100} \right) \cdot (PVs) \quad (4)$$

Donde:

PVs (Mg. C. ha⁻¹) Peso del volumen del suelo,

%C= Porcentaje de carbono,

COS=Carbono Orgánico del suelo.

Análisis estadístico

Se emplearon varios diseños para realizar el análisis a través del software (*Statistical Package for the Social Sciences*, 2024), del cual se realizó la comparación para los datos de

valores de los parámetros físico-químicos a través del análisis estadístico descriptivo. Para un análisis más complejo utilizamos el gráfico de cuadro de barras (univariado), así mismo para obtener la relación de “COS” fue posible mediante la correlación de Pearson con los factores fijos de las variables que tienen más relación (MO, PH, DA, COS y profundidad), Posteriormente analizada la presencia de correlación ($p < 0,05$) se estableció el grado de relación a través del coeficiente de correlación (r) valor que efectúa de -1 a 1. para proceder a realizar se utilizó puntos de dispersión.

Resultados**Características físicoquímico del suelo**

Se han obtenido los valores correspondientes de DA, DR, P, MO, C, COS, y pH hacia las profundidades 0-15cm y 15-30 según el bosque siempreverde y cacao expuesto en el (Tabla 2). Hubo una clara observación respecto a la profundidad de 0-15cm, teniendo altos valores de DR, P, MO, C, COS y pH.

Tabla 2. Valores de medidas y desviación estándar para la profundidad del suelo de 0-15 cm en diferentes variables físico – químicos. COS=Carbono orgánico del suelo, C=carbono, MO=materia orgánica, pH: Potencial de hidrogeno; Da=densidad aparente

Suelo/profundidad		COS (T. ha-1)	C (%)	MO (%)	pH	Da (g/cm3)
Bosque/ Alfisol (0-15)	Media	41,75	2,41	3,70	6,27	1,17
	Desv. Desviación	7,36	0,88	1,72	0,31	0,26
	Mínimo	32,16	1,18	1,58	5,91	0,90
	Máximo	55,02	4,07	7,02	6,87	1,75
	Media	42,19	2,23	3,37	6,46	1,32
Bosque/ Alfisol (15-30)	Desv. Desviación	12,87	0,69	1,06	0,19	0,20
	Mínimo	23,65	1,26	1,95	6,14	1,10
	Máximo	60,13	3,36	4,96	6,72	1,70
	Media	41,91	1,92	2,87	6,49	1,46
	Desv. Desviación	13,86	0,62	0,83	0,37	0,23
Capacidad de almacenamiento	Mínimo	29,56	1,33	1,80	5,66	1,13
	Máximo	69,12	3,10	4,24	6,80	1,87
	Media	39,55	1,78	2,65	6,67	1,47
	Desv. Desviación	14,88	0,66	0,81	0,40	0,176
	Mínimo	21,05	1,07	1,76	5,94	1,23
Cacao/ Inceptisol (15-30)	Máximo	64,32	3,04	4,12	7,14	1,79

Se ha demostrado que los suelos del Cacao/Inceptisol en la capa de 0-15 cm presentan los niveles más altos de (COS), alcanzando un máximo del 69,12%. En contraste, los suelos Cacao/Inceptisol 15-30 muestran los niveles más bajos de COS, con un mínimo de 21,05%. El COS juega un papel crucial en la producción agrícola, siendo esencial para la adaptación de los cultivos. Su presencia influye mucho en el rendimiento de los cultivos agrícolas, respaldado por estudios que confirman su importancia en suelos destinados a la producción agrícola (FAO, 2017).

El carbono (C) almacenado en el Bosque Natural/Alfisol en la capa de 0-15 cm presenta un porcentaje significativamente mayor, alcanzando un 4,07%. En contraste, el contenido de carbono en el cacao/inceptisol a una profundidad de 15-30 cm el cual es más escaso, registrando tan solo un 1,07%. Estos niveles de carbono corresponden a los gases de respiración que resultan de la mineralización microbiana, además, se observa una menor concentración de carbono en los lixiviados del suelo, lo que demuestra su influencia directa en la actividad microbiana (Kanninen, 2000).

Se ha observado que el porcentaje más alto de materia orgánica se encuentra en la zona natural del Bosque/Alfisol (0-15), con un registro del 7,02%. Sin embargo, a mayores profundidades, la materia orgánica muestra una diferencia considerable, aunque con valores más bajos en comparación con otras muestras, marcando un 7,02%.

El potencial de hidrogeno (pH) es importante para el crecimiento de las plantas y en cuanto el Cacao/Inceptisol en la capa de 0-15 cm que nos presenta los niveles más altos de pH, alcanzando un máximo de 6,80. En contraste, los suelos Cacao/Inceptisol 15-30 muestran los niveles más bajos de pH, con un mínimo de 5,94. El pH del suelo nos brinda una información importante sobre la formación del suelo

que determina la acidez, alcalinidad del suelo y su nivel que depende de esto afecta sus propiedades físicas, químicas y biológicas y nos permite aprovecharlo al máximo (Intagri, 2014).

La densidad aparente (D_a) es importante porque permite establecer las plantas superiores, que tiene un alto porcentaje mayor de la densidad aparente de la zona natural del Bosque/Alfisol de 0-15 cm, alcanzando un máximo de 1,75 g/cm³. En contraste en la profundidad de 15-30cm, el Bosque/Alfisol muestran los niveles más bajos de D_a , con un mínimo de 1,10 g/cm³. Estudios realizados en bosques forestales con características climáticas y edáficas similares variaron entre 1,05 g/cm³ a 1,29 g/cm³, siendo el valor mínimo de 0,89 g/cm³ (Torres *et al.*, 2021).

La Figura 2 nos indica los valores de la media de carbono en cobertura y profundidad que corresponden al bosque natural y cacao. Al analizar la gráfica, con respecto a la cobertura, podemos ver que existe una diferencia del valor de la media de carbono, donde se almacena mayor cantidad de carbono en el bosque natural. Para referirnos a la profundidad, notamos que de 0-15 cm, existe una mayor concentración de carbono tanto en bosque natural como en cacao. Se visualiza que bosque natural, en la profundidad de 0-15 cm, existe una concentración de 2,41% y en la misma profundidad en cacao de 1,92%. En la profundidad de 15-30, en bosque natural con un 2,23% supera a cacao el cual contiene 1,79%. Hernández Núñez *et al.* (2021), en su estudio nos indica que el almacenamiento de carbono tuvo una gran diferencia en las diferentes coberturas, siendo este el de bosque con mayor valor, comparado al cacao y otro cultivo. Pues la acumulación del carbono encima del suelo del bosque fue mayor estadísticamente en comparación a lo encontrado en el cacao.

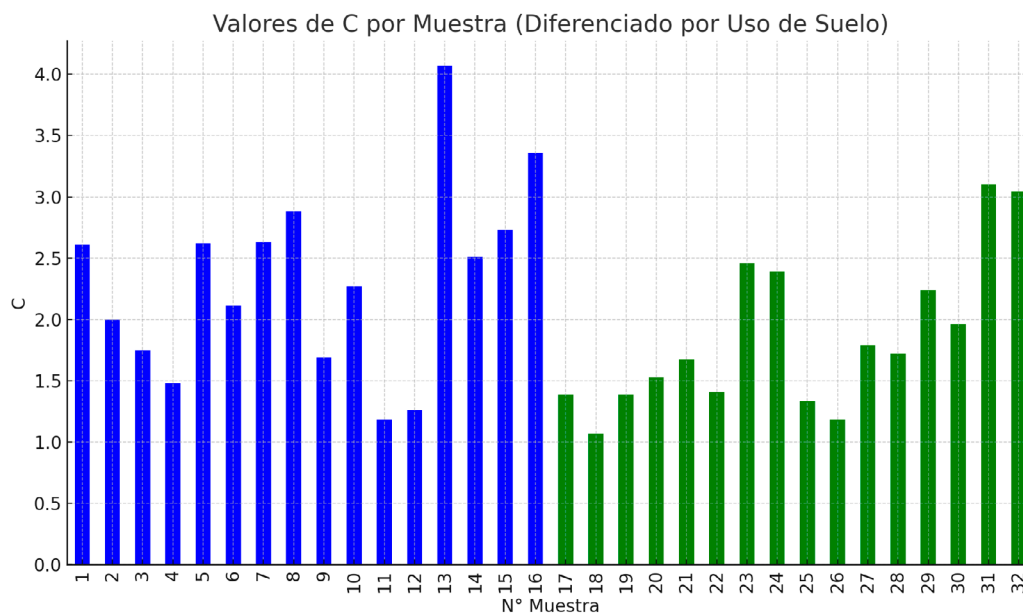


Figura 2. Valores promedio de carbono en un bosque natural y el cultivo de carbono

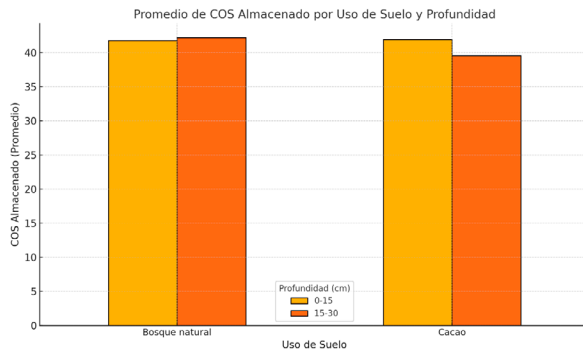


Figura 3. Promedio de COS almacenado por uso de suelo y profundidad

La Figura 3 muestra el contenido de carbono orgánico en cobertura, como tal no existe mayor diferencia en bosque natural como en cacao, ya que sus valores se acercan; sin

embargo, en cuanto a profundidad de 0-15 cm podemos ver que en Bosque natural existe una mayor concentración de COS con 42,20% a diferencia de cacao con 39,56%. Y en la profundidad de 15-30cm, se observa que en bosque natural contiene 41,76% de COS y en cacao, una cantidad de 41,92%, siendo esta mayor al bosque natural. Según Castillo-Pacheco *et al.* (2016) el cambio que se produce en el uso del suelo es la mayor causa para que el carbono sea reducido, con pérdidas grandes de 30 y 50%. Y al deforestar los bosques, estas dan una pérdida de contenido de Carbono orgánico. En muchos casos el contenido de carbono orgánico disminuye con la profundidad. El cambio que surge en el COS es pequeño y este ocurre dentro de los primeros 30 cm., esto se debe a que el carbono está vinculado con la MO, lo que hace que disminuya mientras haya más profundidad (Madrigal Reyes, 2019).

Tabla 3. Relación del COS, resultados en parámetros

		COS
COS	Correlación de Pearson	1
	Sig. (bilateral)	0
MO (%)	Correlación de Pearson	0,471**
	Sig. (bilateral)	0,006
Da(g/cm3)	Correlación de Pearson	0,055
	Sig. (bilateral)	0,766
pH	Correlación de Pearson	-0,383*
	Sig. (bilateral)	0,030
C (%)	Correlación de Pearson	0,786**
	Sig. (bilateral)	0,000
Porosidad (%)	Correlación de Pearson	0,012
	Sig. (bilateral)	0,946
CE (dS.m)	Correlación de Pearson	0,059
	Sig. (bilateral)	0,749
Profundidad (Cm)	Correlación de Pearson	-0,041
	Sig. (bilateral)	0,825

** . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

* . La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral).

La correlación del COS es fuerte correspondiente a 1, en nuestra investigación obtuvimos los siguientes resultados; MO es de 0,47; Da, es de 0,055; pH es de -0,383; C es de 0,786; Porosidad es de 0,012; CE es de 0,059 y de Profundidad es de -0,041 (Tabla 3).

Los parámetros de fuerte relación son COS - C y de relación moderada, COS - pH, COS - MO,” donde podría especificarse el significado de “relación moderada” en términos de valor estadístico específico.

Distribución del Carbono Orgánico del Suelo en Relación a los Nutrientes

La Figura 4 nos muestra fuerte relación debido a que se apega

a la línea de ajuste de COS con el carbono orgánico (%) están ligados fuertemente. Según la FAO (2020a) el COS viene a ser parte de un componente con gran importancia dentro del ciclo global, ocupando casi el 70% del C orgánico de la Biosfera.

Dispersión de puntos COS y pH

La Figura 5 nos muestra el comportamiento negativo del COS en una línea de ajuste de puntos de dispersión. Se observa que la línea va de forma inversa debido a los valores negativos; no existe una relación fuerte entre pH y COS, por lo tanto, no hay atracción o tienen una relación moderada.

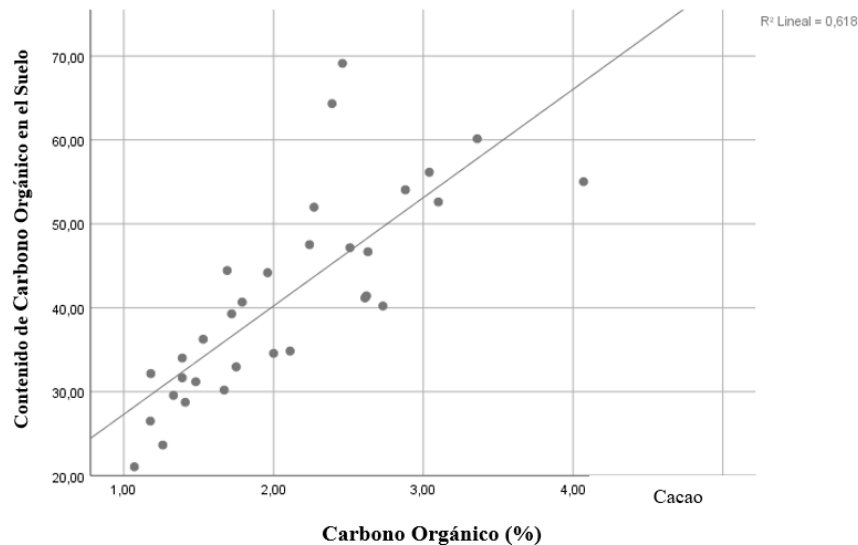


Figura 4. Dispersión de puntos COS y C

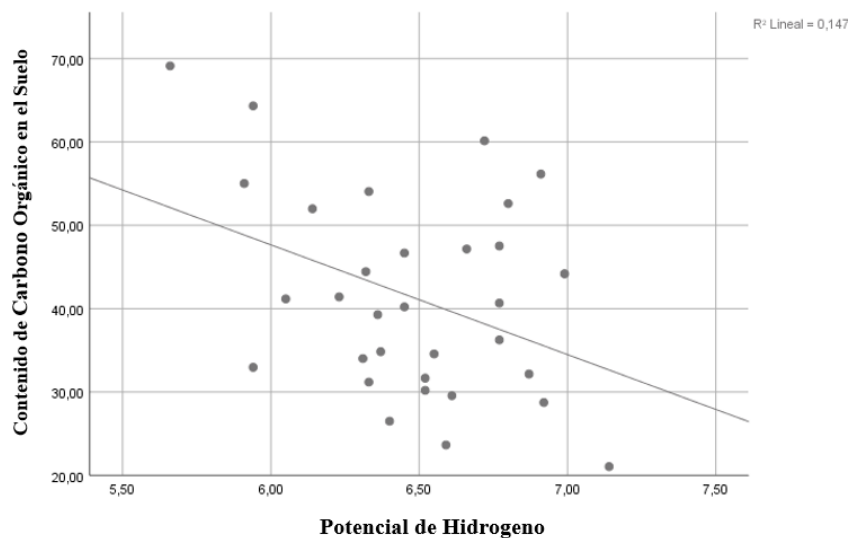


Figura 5. Dispersión de puntos COS y pH

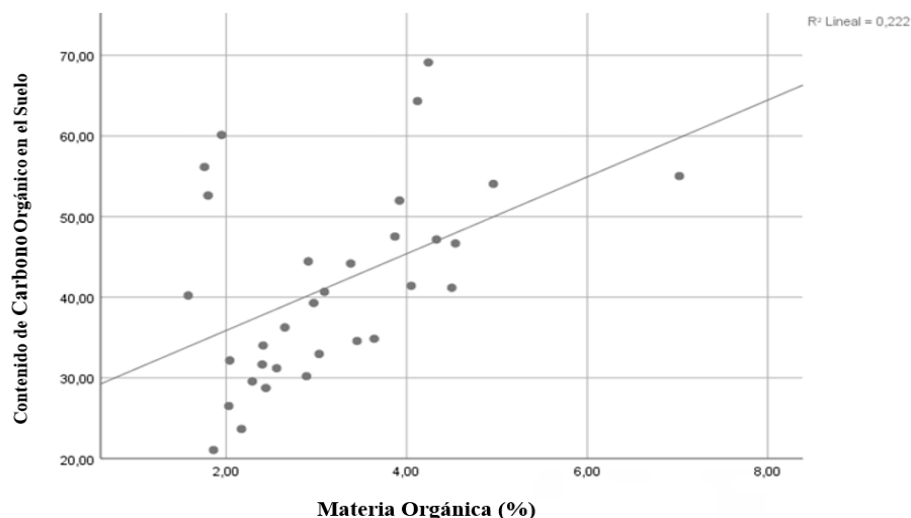


Figura 6. Dispersión de puntos COS y MO

La cantidad de CO da a conocer una tendencia que indica una necesidad de aplicación de manejo de suelo, en cuanto el pH no será limitante para la buena producción del cultivo de cacao, pero se pueden presentar potenciales problemas de acidez en algunas áreas específicas (Sainz Rozas *et al.*, 2011).

En la Figura 6 se observa una correlación moderada, el COS y la MO tienen una correlación dependiente. El COS tiene un papel importante en lo que respecta a las propiedades físicas, químicas y biológicas, destacando el papel dinámico del sistema del suelo sabiendo que puede afectar a otras propiedades sin embargo la relación que tenga es parte de la unión de ambos factores en el suelo (Docampo, 2010).

Discusión

El análisis comparativo del carbono orgánico del suelo (COS) entre un ecosistema de bosque siempre verde y una zona agrícola de cacao resalta cómo el uso del suelo influye directamente en la capacidad de almacenamiento de carbono, estudios como (Lal, 2004) que señala que los bosques naturales, tienden a acumular mayores cantidades de carbono debido a la constante adición de hojarasca y la baja perturbación del suelo. Este aspecto es evidente en este estudio, donde los suelos del bosque siempreverde mostraron una mayor concentración de COS, particularmente en la capa superficial (0-15 cm). Por otro lado, los resultados obtenidos en el suelo del cultivo de cacao refleja una disminución del COS con la profundidad, un patrón también reportado por (Campbell, 1995), quien reportó que las prácticas agrícolas intensivas aceleran la mineralización de la materia orgánica, reduciendo su contenido en capas más profundas. A pesar del que el cultivo de cacao implementa un sistema con prácticas agroforestales, las prácticas agrícolas todavía parecen limitar la retención de carbono en comparación con los otros ecosistemas forestales o bosques nativos.

La correlación positiva observada entre el COS, el carbono (C) y la materia orgánica (MO) es consistente con lo señalado por (Guo y Gifford, 2002), quienes encontraron que estos parámetros son indicadores clave de la calidad del suelo. Sin embargo, el efecto negativo moderado del pH en el COS indica que valores extremos pueden afectar la estabilidad del carbono en el suelo, como lo describen (Bronick y Lal, 2005), quienes resaltan que la acidez del suelo puede influir en la actividad microbiana y en la dinámica de descomposición de la materia orgánica.

El papel del COS en la mitigación del cambio climático, discutido ampliamente por (Orozco-Hueje *et al.*, 2022), destacan la relevancia de proteger los ecosistemas naturales como sumideros de carbono. En este contexto, este estudio aporta evidencia empírica que refuerza la necesidad de adoptar estrategias sostenibles para la gestión del suelo, como la rotación de cultivos, la incorporación de abonos orgánicos y la conservación de los bosques circundantes.

Conclusiones

Los suelos del bosque siempreverde demostraron una capacidad significativamente mayor para almacenar COS en comparación con los suelos del cultivo de cacao, destacando la importancia de los ecosistemas naturales frente a un ecosistema agrícola.

Las prácticas agrícolas del cultivo de cacao con un adecuado manejo agroforestal, pueden aumentar la cantidad de COS debido a la incorporación de materia orgánica.

La relación entre el COS, el C y la MO marca la interdependencia de estos factores en la sostenibilidad del suelo, sin embargo, la influencia del pH sobre el COS indica la necesidad de monitorear y manejar este parámetro para evaluar la calidad y la salud del suelo.

Referencias bibliográficas

- Ayala Niño, F., Maya Delgado, Y. y Troyo Diéguez, E. (2018). Almacenamiento y flujo de carbono en suelos áridos como servicio ambiental: Un ejemplo en el noroeste de México. *Revista Terra Latinoamericana*, 36(2). <https://doi.org/10.28940/terra.v36i2.334>
- Bronick, C. J. y Lal, R. (2005). Estructura y gestión del suelo: Una revisión. *Geoderma*, 124(1-2), 3-22. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.03.005>
- Burbano Orjuela, H. (2018). El carbono orgánico del suelo y su papel frente al cambio climático. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 35(1), 82. <https://doi.org/10.22267/rcia.183501.85>
- Burbano-Orjuela, H. (2016). El suelo y su relación con los servicios ecosistémicos y la seguridad alimentaria. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 33(2), 117-124. <https://doi.org/10.22267/rcia.163302.58>
- Campbell, C. A. (1995). Prácticas de manejo y propiedades de materia orgánica del suelo en suelos de pastizal. *Soil Science Society of America Journal*, 59(1), 217-224. <https://doi.org/10.2136/sssaj1995.03615995005900020056x>
- Castillo-Pacheco, L. A., Bojórquez-Serrano, J. I., Hernández-Jiménez, A. y García-Paredes, D. (2016). Contents of soil organic carbon under different agricultural and vegetation cover. *Cultivos Tropicales*, 37(3), 72-78. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2035.4805>
- Collazos, E. A. (1989). Métodos para la determinación de algunas propiedades físicas de los suelos. En *El análisis de suelos, plantas y aguas para riego. Instituto Colombiano Agropecuario*. <https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/20234>
- Docampo, R. (2010). Importancia de la nutrición mineral en olivo. En: Resultados Experimentales en Olivos -. *Jornada de Divulgación. INIA Serie Actividades de Divulgación N° 626 Octubre 2010*. <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/2410/1/18429121210210356.pdf>
- Duarte, C., Alonso, S., Benito, G., Dachs, J., Montes, C., Pardo, M., Ríos, A., Simó, R. y Valladares, F. (2006). Cambio global. Impacto de la actividad humana sobre el sistema Tierra. https://aeclim.org/wp-content/uploads/2016/01/Cambio_global.pdf
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2017). *Carbono Orgánico del suelo el potencial oculto*. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/6e5e1fa9-ef55-4198-9160-fa580483f991/content>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2020a). *Soil carbon sequestration for improved land management*. <https://www.fao.org/global-soil-partnership/areas-of-work/soil-organic-carbon/en/>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2020b). *The State of Food and Agriculture 2020*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cb1447en>
- Gad Municipal de Pasaje. (2019). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del cantón Pasaje*. https://drive.google.com/file/d/1S85jbvfmnjTl3mA--tRCmiX_b6FLiqn/view
- Guo, L. B. y Gifford, R. M. (2002). Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis *Global Change Biology*, 8(4), 345-360. <https://doi.org/10.1046/j.1354-1013.2002.00486.x>
- 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. y Casanoves, F. (2021). Almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales en los Llanos Orientales de Colombia. *Revista de Biología Tropical*, 69(1). <https://doi.org/10.15517/rbt.v69i1.42959>
- Intagri, S. C. (2014). *Disponibilidad de Nutrientes y pH del Suelo*. <https://www.intagri.com/articulos/nutricion-vegetal/disponibilidad-de-nutrientes-y-el-ph-del-suelo>
- Kanninen, M. (2000). *Secuestro de Carbono en bosques, su papel en el ciclo global*. <https://www.fao.org/4/y4435s/y4435s09.htm>
- Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 123(1), 1-22. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.01.032>
- Loayza, V., Sevilla, V., Olivera, C., Guevara, M., Olmedo, G., Vargas, R., Oyonarte, C. y Jiménez, W. (2020). Mapeo digital de carbono orgánico en suelos de Ecuador. *Ecosistemas*, 29(2), 1852. <http://dx.doi.org/10.7818/ECOS.1852>
- Madrigal Reyes, S., Cristóbal Acevedo, D., Hernández Acosta, E. y Romo Lozano, J. L. (2019). Influencia de la cobertura, pendiente y profundidad, sobre el carbono y nitrógeno del suelo. *Revista Mexicana De Ciencias Forestales*, 10(51), 201-223. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v10i51.113>
- Mendoza, R. B. y Espinoza, A. (2017). *Guía Técnica para muestreo de suelos*. (Universidad Nacional Agraria.). <https://www.studocu.com/latam/document/universidad-nacional-autonoma-de-nicaragua-managua/mecanica-de-suelo/guia-tecnica-para-muestreo-de-suelos/37191180>
- Miller, G. T. y Leon Rodriguez, I. (1994). *Ecología y medio ambiente: Introducción a la ciencia ambiental, el desarrollo sustentable y la conciencia de conservación del planeta tierra*. Grupo Editorial Iberoamérica. https://books.google.com.ec/books/about/Ecolog%C3%ADa_y_medio_ambiente.html?id=Cbl6QgAACAAJ&redir_esc=y

- Orozco-Hueje, D., Barreto-Rojas, D. M., Trujillo González, J. M., Silva-Parra, A., Serrano-Gómez, M., Castillo-Monroy, E. F. y Torres-Mora, M. A. (2022). Sumideros naturales de carbono: Un estudio de caso en morichales de la altillanura colombiana. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 14(1). <https://doi.org/10.22490/21456453.5531>
- Porta, J., López-Acevedo, M. y M. Poch, R. (2013). *Edafología: Uso y protección de suelos* (3ra Edición). Ediciones Mundi-Prensa. <https://acortar.link/P7UFNn>
- Rippstein, G., Escobar, G. y Motta, F. (2001). *Agroecología y biodiversidad de las sabanas en los Llanos Orientales de Colombia*. CIAT. <https://cgspace.cgiar.org/server/api/core/bitstreams/99b8863a-a0cc-458c-bedd-3872ca17c50d/content>
- Robert, M. (2002). *Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/d8b7252e-03c2-4116-8b6c-ebd5ca3c9662/content>
- Sainz Rozas, H. R., Echeverría, H. E. y Angelini, H. P. (2011). Niveles de carbono orgánico y pH en suelos agrícolas de las regiones pampeana y extrapampeana Argentina. *Ciencia del suelo*, 29(1), 29-37. https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-20672011000100004
- Statistical Package for the Social Sciences (Versión 22.0). (2024). [Software].
- Torres, E., P. T., Maza, J. E. y Barrezueta, S. B. (2021). Impacto de dos usos de suelo en el almacenamiento carbono orgánico en el litoral ecuatoriano. *Agroecosistemas*, 9(2), 78-85. <https://aes.ucf.edu.cu/index.php/aes/article/view/472/449>
- Vargas-Larreta, B., Amezcua Rojas, M., López-Martínez, J. O., Cueto-Wong, A., Cruz-Cobos, F., Nájera-Luna, J. A. y Aguirre-Calderón, C. G. (2022). Estimación de los almacenes de carbono orgánico en el suelo en tres tipos de bosque templado en Durango, México. *Botanical Sciences*, 101(1), 90-101. <https://doi.org/10.17129/botsci.3094>
- Vásquez Polo, J. R. y Macías Vázquez, F. (2017). Fraccionamiento químico del carbono en suelos con diferentes usos en el departamento de Magdalena, Colombia. *REVISTA TERRA LATINOAMERICANA*, 35(1), 7. <https://doi.org/10.28940/terra.v35i1.237>

