

Influencia del cambio de uso del suelo sobre las reservas de carbono orgánico en el Parque Natural Regional Cortadera, Boyacá (Colombia)

Influence of land use change on soil organic carbon stocks in the Parque Natural Regional Cortadera, Boyacá (Colombia)

Ingrid Walteros-Torres^{1*} ; Sofía Palacios-Pacheco¹ ; German Eduardo Cely² ; Pablo Antonio Serrano² ; Diego Moreno-Pérez¹

¹Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, UPTC, Grupo de Investigación en Desarrollo y Producción Agraria Sostenible, GIPSO. Tunja - Boyacá, Colombia; e-mail: ingrid.walteros@uptc.edu.co; laurasofia.palacios@uptc.edu.co; diego.morenoperez@uptc.edu.co

²Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, UPTC. Tunja - Boyacá, Colombia; e-mail: german.cely@uptc.edu.co; pablo.serrano@uptc.edu.co

*autor de correspondencia: ingrid.walteros@uptc.edu.co

Cómo citar: Walteros-Torres, I.; Palacios-Pacheco, S.; Cely, G.E.; Serrano, P.A.; Moreno-Pérez, D. 2022. Influencia del cambio de uso del suelo sobre las reservas de carbono orgánico en el Parque Natural Regional Cortadera, Boyacá (Colombia). *Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient.* 25(2):e1846. <http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.1846>

Artículo de acceso abierto publicado por Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, bajo una Licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0

Publicación oficial de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Institución de Educación Superior Acreditada de Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional.

Recibido: abril 13 de 2020

Aceptado: julio 21 de 2022

Editado por: Helber Adrián Arévalo Maldonado

RESUMEN

Los páramos almacenan grandes reservas de carbono orgánico en el suelo (COS), influenciados por las condiciones climáticas y biogeoquímicas, propias del ecosistema; sin embargo, su progresiva conversión hacia cultivos, ganadería o minería incide directamente en las reservas de COS. Con el fin de determinar el efecto que ejerce el cambio de uso de suelo sobre la variabilidad de las reservas de COS, se realizó un monitoreo de COS entre 2013, 2018 y 2020, en el Parque Natural Regional Cortadera. Se estudiaron parcelas permanentes de muestreo (PPM), ubicadas bajo tres diferentes usos del suelo: conservado, en recuperación e intervenido. Se analizaron muestras de carbono orgánico y densidad aparente, a dos profundidades (0-15 cm y 15-30 cm). Se encontró que la PPM en escenario conservado presentó los contenidos más altos de COS, con valores de 290,37; 199,22 y 257,5 tC ha⁻¹, para cada uno de los años en estudio; seguido por la PPM en recuperación, que evidenció valores de COS 215,3 tC ha⁻¹, en el 2020, en contraste con la PPM intervenida, que presentó contenidos mínimos de 15,50; 34,01 y 88,06 tC ha⁻¹. Se observó que los mayores contenidos de COS se encuentran a la profundidad de 15 a 30 cm. Dichos aspectos,

resaltan la importancia de avanzar en acciones enfocadas a la protección de ecosistemas estratégicos, considerando las constantes amenazas relacionadas con la transformación del paisaje y, con ello, la posibilidad de proveer funciones y servicios asociados a la captura de carbono y la regulación climática.

Palabras clave: Cambio de uso del suelo; Carbono orgánico; Páramo; Monitoreo ambiental; Servicios ecosistémicos.

ABSTRACT

The paramos accumulate high stocks of soil organic carbon (SOC), influenced by the climatic and biogeochemical conditions of the ecosystem. However, their progressive conversion to crops, livestock, or mining has a direct impact on the SOC stocks. To determine the effect of land use change on the variability of SOC stocks, monitoring of SOC content was conducted between the years 2013, 2018, and 2020 in the Parque Natural Regional Cortadera. Permanent sampling plots (PPS) located under three different land uses were studied: conserved, recovering, and intervened. To do so, samples of soil organic carbon and bulk density at two depths were

analyzed (0-15 cm and 15-30 cm). The conserved PPS showed the highest SOC contents, with maximum values of 290.37; 199.22, and 257.5 tC ha⁻¹ for each of the years under study; follow by the recovery PPM that presented COS values of 215.3 tC ha⁻¹ in 2020, in contrast to the intervened PSP that showed minimum contents of 15.50; 34.01 and 88.06 tC ha⁻¹. Furthermore, the highest SOC contents were found at 15-30 cm depth. These factors emphasize the importance of carrying out actions focused on protecting strategic ecosystems such as paramos, taking into account the continuous threats related to the transformation of the landscape and, consequently, the possibility of providing ecosystem functions and services related to carbon capture and climate regulation.

Keywords: Ecosystem services; Environmental Monitoring; Land use change; Organic carbon; Paramo.

INTRODUCCIÓN

Los suelos son uno de los recursos claves para la mitigación y la adaptación al cambio climático, ya que constituyen el principal almacén de carbono en ecosistemas terrestres (FAO, 2020) y hacen parte de las cuatro mayores reservas de carbono, además de la atmósfera, los océanos, las existencias de combustibles fósiles y los ecosistemas terrestres (vegetación y suelos) (Castañeda-Martín & Montes-Pulido, 2017); sin embargo, este recurso puede actuar como fuente o sumidero de gases de efecto invernadero (GEI), dependiendo de su uso y manejo (IGAC, 2018). Se estima que el carbono orgánico del suelo (COS) constituye, aproximadamente, dos tercios de la reserva de carbono del ecosistema terrestre (Zhang *et al.* 2018).

El suelo almacena tres veces más carbono que la biomasa aérea y es un sumidero de carbono relativamente estable, en especial, en el perfil más profundo (Masciandaro *et al.* 2018); no obstante, estos almacenes son susceptibles a las interferencias humanas, principalmente, a actividades que cambia el uso o la cobertura de la tierra (IPCC, 2020). Se cree que, en todo el mundo, las conversiones de bosques primarios a tierras agrícolas están agotando el COS, mientras que la forestación se considera un medio para restaurar estos almacenes (Stockmann *et al.* 2013), donde el tipo de vegetación influye fuertemente en las propiedades del suelo (Sylvester *et al.* 2017).

En los ecosistemas naturales, las tasas de formación y la descomposición de carbono orgánico del suelo (COS), se mantienen en equilibrio constante (Cerri *et al.* 2007), contrario a lo que ocurre en agroecosistemas, donde las prácticas de uso y manejo pueden alterar los ingresos de materia orgánica (MO), influyendo en la capacidad de captura de carbono (Caviglia *et al.* 2016).

De acuerdo con la IPCC (2020), entre el 2007 y 2016, las actividades relativas a la agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra, representaron alrededor del 13 % de las emisiones de CO₂, el 44 % de las de metano (CH₄) y el 81 % de las de óxido nitroso (N₂O), procedentes de las actividades humanas, a nivel mundial, lo que representa el 23 % del total de emisiones antropógenas netas

de GEI. La preocupación por el aumento acelerado de GEI, por causa de actividades antrópicas, es cada vez más evidente, ya que se constituye como la principal causa del calentamiento global (Salvo & Bayer, 2014).

Como se indicó, los suelos son el mayor almacén terrestre de carbono, a nivel global y, por tanto, tienen una influencia directa en la concentración de CO₂ en la atmósfera (IDEAM *et al.* 2017). Los modelos globales estiman emisiones netas de CO₂ de 5,2 ± 2,6 GtCO₂ año⁻¹, procedentes del uso y el cambio de uso del suelo, durante el periodo comprendido entre 2007-2016. Esas emisiones netas se deben, principalmente, a la deforestación y a emisiones y remociones procedentes de otras actividades del uso del suelo (IPCC, 2020).

Según la Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático del IDEAM *et al.* (2017), en Colombia, los territorios presentan vulnerabilidades preexistentes que se pueden ver exacerbadas, por causa del cambio climático. Lo anterior condiciona la sostenibilidad de ecosistemas estratégicos, como los páramos, afectando los servicios ecosistémicos que brindan para el bienestar humano, como la regulación y provisión de agua, el almacenamiento de carbono y la biodiversidad (Cárdenas & Tobón, 2017).

Los suelos de páramo tienen la capacidad de acumular grandes cantidades de carbono (Castañeda-Martín & Montes-Pulido, 2017), debido a las bajas tasas de mineralización y una gran acumulación de materia orgánica, que se da gracias a las bajas temperaturas, especialmente, durante la noche y a las condiciones edáficas, como los altos contenidos de humedad (Curiel Yuste *et al.* 2017); sin embargo, la capacidad del páramo para mantener los altos niveles de carbono en el suelo se ve amenazada, por el cambio de uso de la tierra de pastizales y matorrales a usos agrícolas y a los efectos del cambio climático (Thompson *et al.* 2021). Estas actividades están exponiendo el suelo a condiciones de degradación, fundamentalmente, por la compactación, la erosión y el cambio de los almacenes de carbono (Lis-Gutiérrez *et al.* 2019); de esta manera, dichas características pueden convertirlo, tanto en sumidero como en fuente neta CO₂ a la atmósfera.

En este sentido, es fundamental mejorar el conocimiento sobre el papel del páramo como sumidero de carbono, además de entender la influencia que ejerce el cambio de uso del suelo, sobre dichos almacenes. Por lo tanto, el objetivo del presente estudio fue realizar un monitoreo del contenido de carbono orgánico en suelos del Parque Natural Regional Cortadera, a partir de una línea base establecida en el 2013 (Forero Ulloa *et al.* 2015) y una fase de monitoreo en 2018 y 2020. Para ello, se estudiaron Parcelas Permanentes de Muestreo (PPM), bajo tres usos de suelo: conservado, en recuperación e intervenido, permitiendo identificar las principales dinámicas de uso del suelo que condicionan el COS almacenado y, así, avanzar hacia una agenda de investigación, que integre medidas de gestión para la sostenibilidad de los ecosistemas de páramo y, con ello, la preservación de los diversos servicios ecosistémicos que brindan, para el bienestar humano.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio. El estudio, se llevó a cabo en el páramo La Cortadera, en el complejo Tota-Bijagual-Mamapacha, ubicado entre los 3.100 y 3.970 m s.n.m. (Morales Rivas *et al.* 2007), en el departamento de Boyacá, Colombia (Figura 1).

Se usó un diseño experimental estratificado al azar y, con base en estudios de levantamiento de suelos y coberturas para la zona, se identificaron tres escenarios de muestreo, de acuerdo con el uso del suelo: conservado, el cual, presenta vegetación de páramo (Vp); en recuperación, que presenta una vegetación herbácea muy rala sobre afloramientos rocosos (Pe) e intervenido, con cultivos transitorios

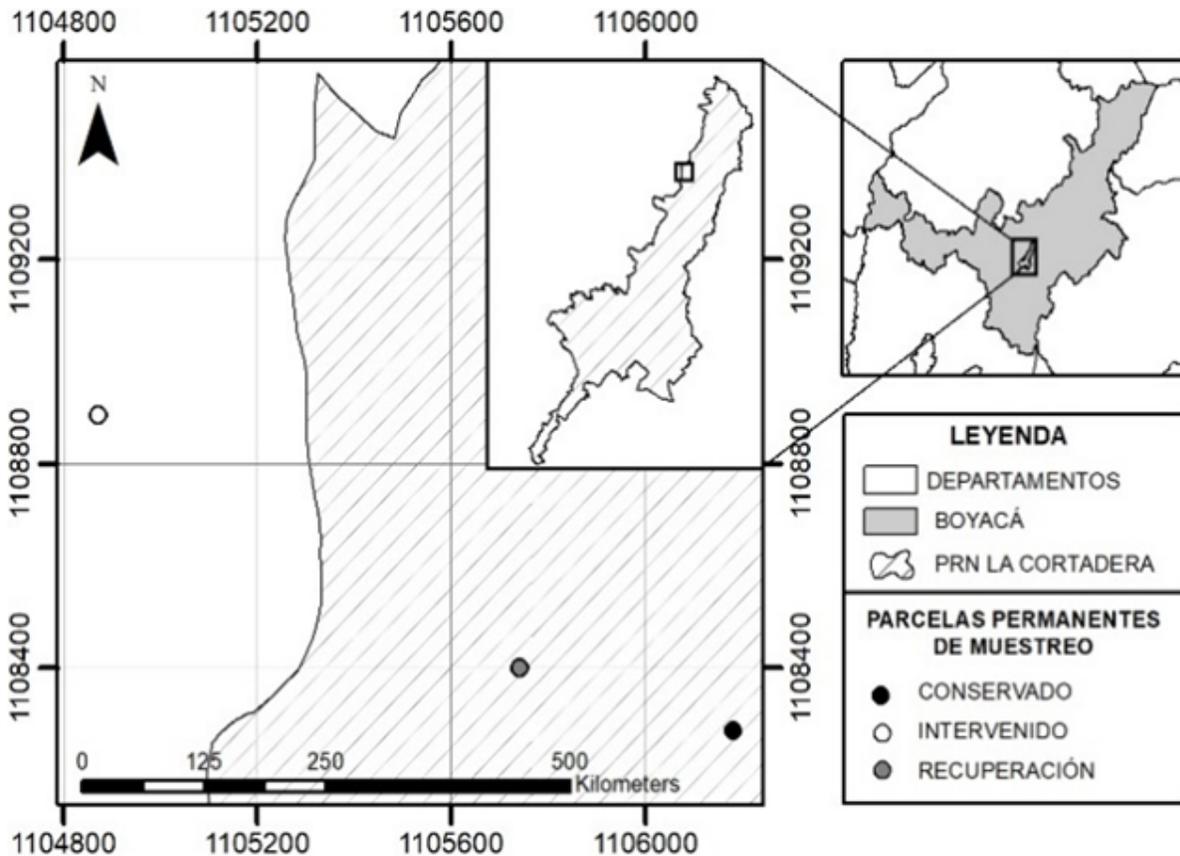


Figura 1. Mapa de ubicación de las parcelas permanentes de muestreo PPM dentro del complejo Tota-Bijagual-Mamapacha, Parque Natural Regional Cortadera, Boyacá-Colombia.

(Forero Ulloa *et al.* 2015). En cada uno de estos, se establecieron parcelas permanentes de muestreo (PPM), de un metro de ancho por un metro de largo, debido a que proveen datos reales y fácilmente verificables (MacDicken, 1997).

Muestreo de suelos. Se realizaron tres muestreos de suelo: el primero, en el 2013 (Forero Ulloa *et al.* 2015), con el objetivo de establecer la línea base del COS; el segundo, en el 2018 y, el tercero, en el 2020, para conocer la dinámica del carbono, teniendo en cuenta variables temporales y de cambio de uso del suelo (monitoreo). En cada PPM, se hicieron cajuelas de 50 cm de ancho por 50 cm de largo y 50 cm de profundo, con el fin de tomar muestras para carbono orgánico (CO) y densidad aparente (pb) (Figura 2). La periodicidad del monitoreo, se definió según las condiciones de uso del suelo al momento de realizar el primer muestreo; de esta manera y teniendo en cuenta que la parcela ubicada en el uso “en recuperación” se encontraba en procesos de restauración asistida, se optó por realizar el siguiente

muestreo cinco años después, con el objetivo de observar la dinámica del COS, frente a un proceso de restauración, considerando que en un proceso de restauración están involucrados diversos aspectos ecológicos, económicos y sociales, que convergen en un momento y un espacio definido (MADS, 2015). Luego del segundo muestreo y considerando la evolución del área de muestreo frente al proceso de restauración, se definió un lapso de dos años, para realizar el tercer muestreo y, de esa manera, llevar a cabo el proceso de monitoreo.

Para CO se tomaron muestras separadas, a las profundidades de 0-15 y 15-30 cm. Las muestras obtenidas en cada uno de los tres puntos se mezclaron, para obtener una muestra compuesta para cada una de las dos profundidades; posteriormente, fueron llevadas a laboratorio, para su determinación por el método de Walkley-Black (oxidación húmeda). Respecto a la pb, se utilizaron cilindros de volumen conocido, tomando una muestra por cada PPM para cada profundidad.

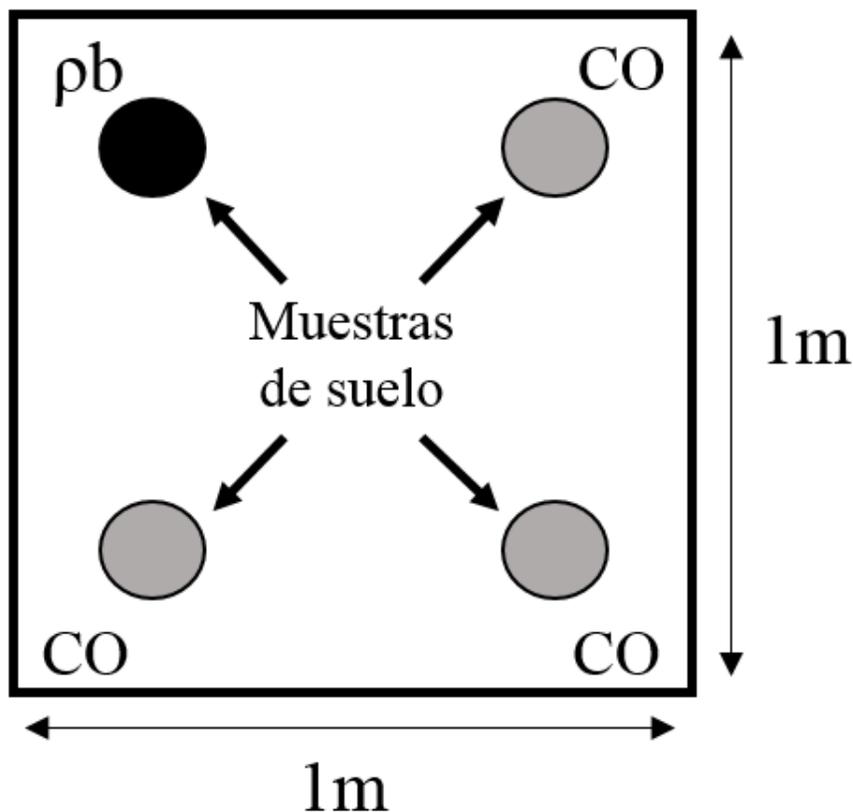


Figura 2. Diseño de toma de muestras para carbono orgánico (CO) y densidad aparente (ρ_b), de acuerdo con Rüginitz et al. (2009).

Carbono orgánico del suelo. Para la determinación del COS, se utilizó la ecuación propuesta por Calderón *et al.* (2013), para monitoreo de contenidos y flujos de carbono, en gradientes altitudinales altoandinos, la cual, se describe en la ecuación 1.

$$\text{COS} = [\text{CO}] \cdot \rho_b \cdot h \quad \text{ecuación 1}$$

Donde, COS es el contenido de carbono orgánico del suelo (tC ha^{-1}), CO es la concentración de carbono orgánico de suelo (%), ρ_b es la densidad aparente (g cm^{-3}) y h es la profundidad, a la cual, se tomó la muestra (cm).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Contenidos de carbono orgánico del suelo. La PPM en suelo conservado presentó los valores más altos de COS, con $290,37 \text{ tC ha}^{-1}$, para el 2013, seguido por la PPM recuperación, para el 2020 ($117,4 \text{ tC ha}^{-1}$) y para el 2013, con $106,35 \text{ tC ha}^{-1}$, para la profundidad de 0-15 cm (Figura 3a). Al respecto Thompson *et al.* (2021) mencionan que el páramo andino se destaca por su alto almacenamiento de carbono en el suelo y su contribución a los servicios ecosistémicos. Los resultados de la investigación contrastan con los de Zúñiga-Escobar *et al.* (2013), quienes reportan un cálculo de COS en ecosistemas no intervenidos de alta montaña, de $520,9 \text{ t ha}^{-1}$, en páramo y $323,6 \text{ t ha}^{-1}$, en bosque alto andino del parque nacional natural Chingaza, en el departamento de Cundinamarca y, a su vez, de $373,0 \text{ t ha}^{-1}$, en páramo y $254,6 \text{ t ha}^{-1}$, en bosque alto andino del Parque Nacional Natural Los Nevados, ubicado en el

departamento del Tolima. Estos resultados, se deben a la afirmación de Castañeda-Martín & Montes-Pulido (2017), quienes agregan que los COS dependen de la vegetación natural, donde la protección de la superficie del suelo es determinada por el tipo de cobertura vegetal, por ejemplo, cuando se cuenta con densas coberturas generadas por plantas briofitas y especies arbustivas, las cuales aíslan el suelo de la precipitación e incidencia directa de la radiación solar se puede presentar una mayor cantidad de carbono orgánico, debido a que hay una menor descomposición de la materia orgánica (Zimmermann *et al.* 2010).

Los contenidos de COS en la PPM, bajo uso intervenido, para el 2013 y 2018, presentaron valores muy bajos, con $15,50$ y $34,01 \text{ tC ha}^{-1}$, respectivamente, si se comparan con los datos de Zúñiga-Escobar *et al.* (2013), quienes reportaron en zonas intervenidas de páramo, valores de $135,1 \text{ tC ha}^{-1}$. Resultados similares fueron encontrados por Daza Torres *et al.* (2014), quienes realizaron estudios del contenido de carbono sobre suelos, con cuatro usos diferentes, en el páramo de Sumapaz y determinaron que los suelos con agricultura intensiva y lotes en descanso revelaban los valores más bajos de carbono orgánico. Esto, se debe a que, probablemente, la eliminación de la vegetación natural y la alteración del suelo y su transformación hacia actividades, como la agricultura y ganadería, aceleran los procesos de oxidación de la materia orgánica, imposibilitando o disminuyendo la fijación de carbono en el suelo (Don *et al.* 2011). La capacidad del páramo para mantener altos niveles de carbono en el suelo se ve amenazada, por el cambio de uso de la tierra de pastizales y matorrales a usos agrícolas (Thompson *et al.* 2021).

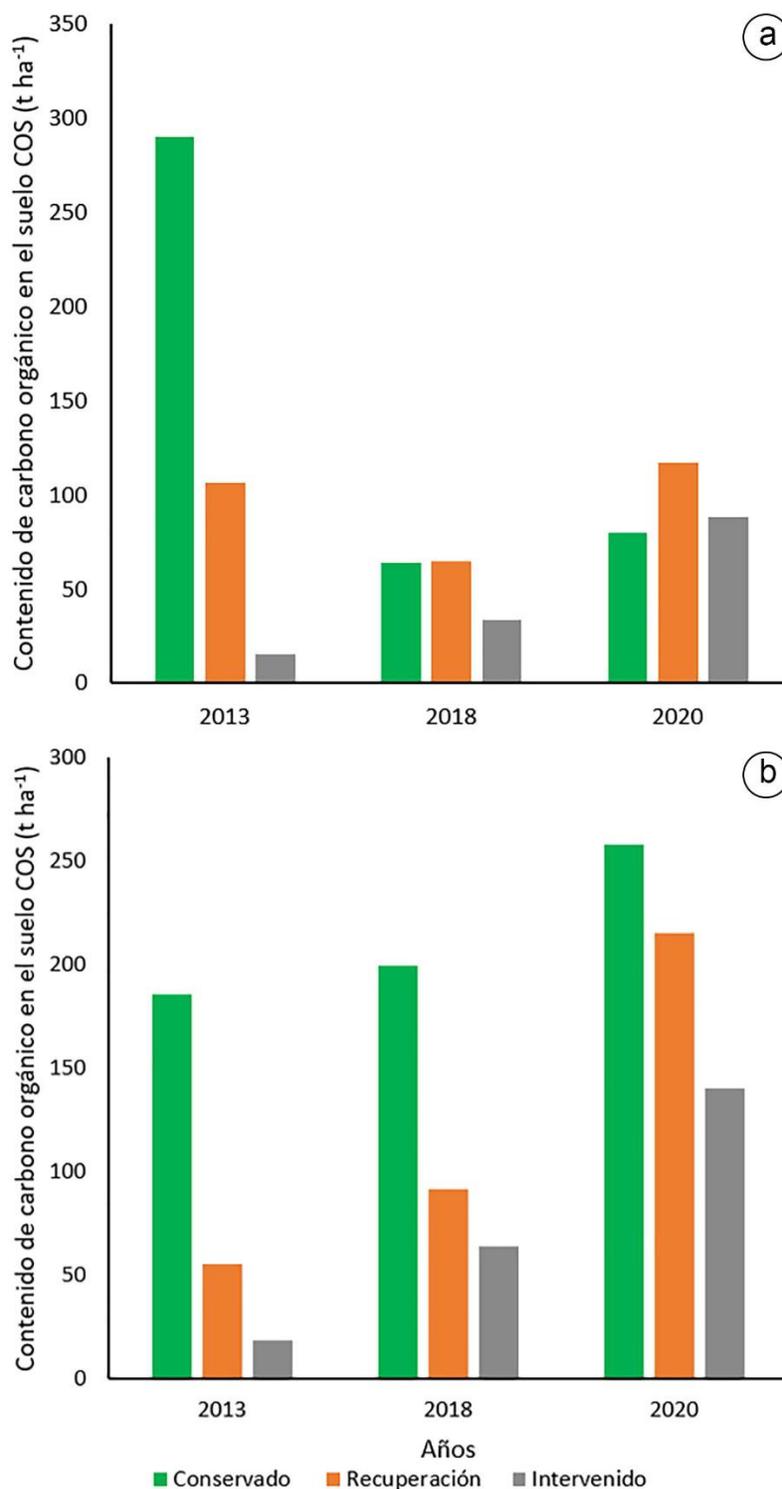


Figura 3. Contenido de carbono orgánico en el suelo COS en t ha⁻¹ en las parcelas permanentes de muestreo conservado, en recuperación e intervenido. a) Contenido de COS en la profundidad de 0-15 cm; b) Contenido de COS en la profundidad de 15-30 cm.

Para el 2013, que corresponde a la línea base, los contenidos más altos de COS para cada una de las parcelas, se registraron en la profundidad de 0-15 cm (Figura 3), que concuerda con lo descrito por Carvajal *et al.* (2009), quienes indican que, a medida que aumenta la profundidad del suelo, se disminuye la acumulación de COS; no obstante, en el monitoreo llevado a cabo en el 2018

y 2020, a pesar de presentarse la misma tendencia, que indica que los contenidos más altos se encuentran en suelos conservados, con valores de 199,22 y 257,6 tC ha⁻¹, hay una variación influenciada por la profundidad, a la cual, fueron tomadas las muestras, es decir, de 15-30 cm (Figura 3b). Estos datos, se relacionan con la información reportada por Olson & Al-Kaisi (2015),

donde observaron un aumento en los valores de COS a mayor profundidad de muestreo. De igual forma, en una investigación realizada en Ecuador, sobre la eficiencia de la implementación de un programa de pago por servicios ambientales (PSA), sobre las reservas de carbono, los autores resaltan el alto potencial del suelo de páramo, como sumidero, entre 206,1 y 548,6 tC ha⁻¹, siendo representativas profundidades de muestreo hasta un máximo 60 cm (Bremer *et al.* 2016).

En general, los valores de COS obtenidos en el Parque Natural Regional Cortadera concuerdan con los reportados por Gutiérrez *et al.* (2020), en donde los valores oscilaron entre 22 y 338 t ha⁻¹, con promedio de 164 t ha⁻¹, en páramos de Colombia y, específicamente para Boyacá, los valores máximos de COS fueron de 289,07 t ha⁻¹, mínimos de 64,79 t ha⁻¹ y un promedio de 161,4 t ha⁻¹ (Gutiérrez *et al.* 2020). Asimismo, son altos, comparados con los reportados por Fernández-Pérez *et al.* (2019), en el páramo de Rabanal, en Boyacá, con valores entre 46,7 y 106 tC ha⁻¹, para las profundidades de 0-15 y de 15-30 cm, respectivamente y con los obtenidos por Visconti &

De Paz (2017), en España, en donde encontraron valores promedio de 50,48 a 66,56 tC ha⁻¹.

Variación temporal de COS. Respecto a la variación temporal de los contenidos de COS, entre el 2013-2018-2020, como se observa en la tabla 1, se presenta un marcado descenso de los valores de COS en la PPM conservada. En este punto, se destaca el papel de la densidad aparente (ρ_b), como factor multiplicador, pues tal como se presenta en la tabla 1, la ρ_b , para el uso conservado en el 2013, alcanza valores de 1,39 g cm⁻³, difiriendo de lo hallado, bajo el mismo escenario, en 2018, con una ρ_b de 0,41 g cm⁻³ y 0,33 cm⁻³, para el 2020, en la misma profundidad. La densidad aparente en otros suelos de páramos conservados, se reporta con valores entre 0,62 a 0,8 g cm⁻³ (Estupiñán *et al.* 2009; Zúñiga-Escobar *et al.* 2013; Daza Torres *et al.* 2014). Daza Torres *et al.* (2014) mencionan que la baja densidad aparente de estos suelos se da por sus características orgánicas, alta porosidad y la gran cantidad de especies vegetales y sus sistemas radiculares en los primeros centímetros del suelo, lo que les confiere gran capacidad de almacenamiento de agua.

Tabla 1. Descripción de la variación de valores de carbono orgánico CO (%), densidad aparente ρ_b (g cm⁻³) y carbono orgánico en el suelo COS (tC ha⁻¹), en las dos profundidades de estudio (0-15 y 15-30 cm) y para 2013, 2018 y 2020.

	PPM conservada								
	CO (%)			ρ_b (g cm ⁻³)			COS (t C ha ⁻¹)		
Años/ profundidad	2013	2018	2020	2013	2018	2020	2013	2018	2020
0-15 cm	13,96	10,41	16,15	1,39	0,41	0,33	290,37	64,32	79,94
15-30 cm	11,63	10,62	13,21	0,53	0,63	0,65	185,51	199,22	257,6
	PPM en recuperación								
0-15 cm	6,58	4,55	6,69	1,08	0,95	1,17	106,35	65,00	117,4
15-30 cm	3,32	3,37	6,24	0,55	0,90	1,15	55,10	91,34	215,3
	PPM intervenida								
0-15 cm	0,93	2,34	5,7	1,11	0,97	1,03	15,50	34,01	88,06
15-30 cm	0,46	2,18	4,68	1,35	0,97	1,00	18,60	63,46	140,4

Por su parte, Quichimbo *et al.* (2012) afirman que la materia orgánica presente en el suelo influye directamente sobre propiedades físicas, como la estructura, lo que se traduciría en valores más bajos de densidad aparente en suelos en conservación y, con ello, mayor capacidad de mantener las funciones ecológicas del páramo y brindar servicios ecosistémicos, como la regulación hídrica y la captura de carbono.

Al comparar las concentraciones de carbono orgánico del suelo (%CO) en el PPM conservado (Tabla 1), se observaron diferencias significativas entre los años y en ambas profundidades; esto permite concluir, que es importante incluir estudios enfocados a corregir la ecuación para la determinación de COS, siendo un factor crucial para adelantar este tipo de análisis, ya que permitirá establecer, de manera más adecuada, valores reales y verificables, para cada tipo de uso del suelo. Cabe resaltar que, en algunas ocasiones, no siendo este el caso, se ha evidenciado que la ρ_b es determinante a la hora de realizar la comparación entre un uso intervenido y otro conservado, lo cual, puede llegar a distorsionar los cálculos de las

reservas de COS. Por su parte Ellert & Bettany (1995) mencionan que las evaluaciones de los cambios inducidos por el manejo en las cantidades de carbono y de otros elementos almacenados en los suelos, son influenciadas por el método utilizado para calcular la concentración del elemento. Las estimaciones convencionales de masas de elementos en horizontes genéticos o profundidades de muestreo fijas (calculado como el producto de la concentración, la densidad aparente y el espesor) resultan en comparaciones desiguales e injustificadas, porque el muestreo de suelo y la identificación de la formación de horizontes en el campo pueden ser indicadores poco fiables de la redistribución del mismo.

De manera general, cada una de las PPM, en la fase monitoreo, presentó una tendencia similar frente a la línea base, manteniéndose valores elevados de COS en ecosistemas en estado de conservación y decreciendo en áreas de páramos, que tienen algún grado de intervención, en este caso, agricultura; sin embargo, si se analiza la parcela bajo un uso intervenido en conjunto (0-15 cm y 15-30 cm), para los tres periodos de estudio, se encuentra que,

independientemente de la densidad aparente, la cual, se presentó como constante, este uso fue el único que tuvo un aumento respecto a la línea base (Tabla 1). Patiño *et al.* (2021) afirman que el pastoreo compacta el suelo y aumenta la densidad aparente, reduciendo la infiltración y la capacidad de retención de agua. La agricultura aumenta la macroporosidad y promueve la pérdida de nutrientes y materia orgánica del suelo. Por último, la forestación con especies exóticas, por ejemplo, con pinos o eucaliptos, disminuye la materia orgánica del suelo y la capacidad de retención de agua, al cambiar la estructura del suelo.

El almacenamiento de COS se ve afectado directa o indirectamente por los humanos, los cambios en el uso de la tierra, la erosión del suelo, el cambio climático, las comunidades de microbios y sus actividades y las propiedades fisicoquímicas del suelo (Zhu *et al.* 2021). En este sentido, la dinámica del cambio de uso y manejo del suelo aparece como un factor determinante en escenarios de calentamiento global, puesto que el suelo “puede ser una espada de doble filo” como sumidero, a través del almacenamiento de grandes cantidades de carbono orgánico (COS) (De Souza Barros, 2013) y como fuente neta de GEI, debido al desarrollo de prácticas insostenibles de manejo y la mineralización acelerada del COS (De Souza Barros, 2013). Como indica Thompson *et al.* (2021), el páramo andino se destaca por su alto almacenamiento de carbono en el suelo y su contribución a los servicios ecosistémicos; sin embargo, la capacidad del páramo para mantener altos niveles de carbono en el suelo, se ve amenazada por el cambio de uso de la tierra de pastizales y matorrales a usos agrícolas.

Respecto a la influencia de la profundidad de muestreo, se encontró que, en la mayoría de PPM evaluadas, sin importar la condición de uso del suelo, los contenidos de COS tienden a aumentar, a partir de los 15 cm. Estos resultados, se validan con información presentada por Olson & Al-Kaisi (2015), y Cunalata *et al.* (2013), quienes indican que a dicha profundidad los procesos de humificación en el suelo tienden a ser más estables; sin embargo, contrastan con lo reportado por Padbhushan *et al.* (2022), quien afirman que los cambios en las reservas y las propiedades de carbono del suelo, son más pronunciados en los suelos superficiales (0-15 cm) que en los suelos subterráneos (15-30 cm y 30-45 cm).

Con relación a la frecuencia del monitoreo, Calderón *et al.* (2013) proponen cuantificar los reservorios de carbono de un ecosistema cada dos años, pudiendo variar, dependiendo de los intereses científicos y de los recursos económicos disponibles. Además, González-Molina *et al.* (2008) mencionan que, al momento de determinar el cambio temporal del carbono en suelos, se deben considerar las laderas y con miras a disminuir errores, se recomienda estandarizar procesos en laboratorio; además, es recomendable tener un banco de datos del suelo del primer muestreo, con el fin de realizar los mismos procesos metodológicos con el nuevo muestreo.

Agradecimientos. Extendemos nuestros agradecimientos a los coinvestigadores de la Universidad de La Salle, especialmente, a los docentes vinculados a la escuela de Ingeniería Ambiental y Sanitaria. De igual forma, a los demás integrantes del grupo de investigación

GIPSO de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, quienes contribuyeron en esta investigación. **Conflicto de intereses:** El manuscrito fue preparado y revisado con la participación de los autores, quienes declaran no tener algún conflicto de interés que coloquen en riesgo la validez de los resultados aquí presentados. **Financiación:** Proporcionada por Minciencias, la Gobernación de Boyacá dentro de la convocatoria de Boyacá Bio y Corpoboyacá.

REFERENCIAS

1. BREMER, L.L.; FARLEY, K.A.; CHADWICK, O.A.; HARDEN, C.P. 2016. Changes in carbon storage with land management promoted by payment for ecosystem services. *Environmental Conservation*. 43(4):397-406.
2. CALDERÓN, M.; ROMERO-SALTOS, H.; CUESTA, F.; PINTO, E.; BAEZ, S. 2013. Monitoreo de contenidos y flujos de carbono en gradientes altitudinales. CONDESAN/COSUDE (Quito-Ecuador). 64p.
3. CÁRDENAS, M.F.; TOBÓN, C. 2017. Recuperación del funcionamiento hidrológico de ecosistemas de páramo en Colombia. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*. 20(2):403-412. <https://doi.org/10.31910/rudca.v20.n2.2017.381>
4. CARVAJAL, A.F.; FEIJOO, A.; QUINTERO, H.; RONDON, M.A. 2009. Carbono orgánico del suelo en diferentes usos del terreno de paisajes andinos colombianos. *Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal*. 9(3):222-235. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-27912009000300005>
5. CASTAÑEDA-MARTÍN, A.E.; MONTES-PULIDO, C.R. 2017. Carbono almacenado en páramo andino. *Entramado*. 13(1):210-221. <https://doi.org/10.18041/entramado.2017v13n1.25112>
6. CAVIGLIA, O.P.; WINGEYER, A.B.; NOVELLI, L.E. 2016. El rol de los suelos agrícolas frente al cambio climático. *Serie de Extensión INTA Paraná*. 78:27-32.
7. CERRI, C.E.P.; SPAROVEK, G.; BERNOUX, M.; EASTERLING, W.E.; MELILLO, M.; CERRI, C.C. 2007. Tropical agriculture and global warming: impact and mitigation options. *Scientia Agricola*. 64:83-99. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162007000100013>
8. CUNALATA, C.; INGA, C.; ALVAREZ, G.; RECALDE, C.; ECHEVERRÍA, M. 2013. Determinación de carbono orgánico total presente en el suelo y la biomasa de los páramos de las comunidades del chimborazo y shobol llinllin en Ecuador. *Boletín Del Grupo Español Del Carbón*. 27(27):10-13.
9. CURIEL YUSTE, J.; HEREŞ, A.-M.; OJEDA, G.; PAZ, A.; PIZANO, C.; GARCÍA-ANGULO, D.; LASSO, E. 2017.

- Soil heterotrophic CO₂ emissions from tropical high-elevation ecosystems (Páramos) and their sensitivity to temperature and moisture fluctuations. *Soil Biology and Biochemistry*. 110:8-11.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.02.016>
10. DAZA TORRES, M.; HERNÁNDEZ FLÓREZ, F.; TRIANA, F. 2014. Efecto del uso del suelo en la capacidad de almacenamiento hídrico en el Páramo de Sumapaz - Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*. 67(1):7189-7200.
<https://doi.org/10.15446/rfnam.v67n1.42642>
 11. DE SOUZA BARROS, D.E.S. 2013. Contribuições da matéria orgânica do solo para mitigar as emissões agrícolas de gases de efeito estufa. *Polêmica*. 12(2):341-351.
<https://doi.org/10.12957/polemica.2013.6436>
 12. DON, A.; SCHUMACHER, J.; FREIBAUER, A. 2011. Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks - a meta-analysis. *Global Change Biology*. 17(4):1658-1670.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02336.x>
 13. ELLERT, B.H.; BETTANY, J.R. 1995. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. *Canadian Journal of Soil Science*. 75(4):529-538.
<https://doi.org/10.4141/cjss95-075>
 14. ESTUPIÑAN, L.H.; GÓMEZ, J.E.; BARRANTES, V.J.; LIMAS, L.F. 2009. Efecto de actividades agropecuarias en las características del suelo en el páramo el Granizo, (Cundinamarca - Colombia). *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*. 12(2):79-89.
<https://doi.org/10.31910/rudca.v12.n2.2009.694>
 15. FERNÁNDEZ-PÉREZ, C.; CELY REYES, G.E; SERRANO, P.A. 2019. Cuantificación de la captura de carbono y análisis de las propiedades del suelo en coberturas naturales y una plantación de pino en el páramo de Rabanal, Colombia. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*. 28(1):121-133.
<https://doi.org/10.15446/rcdg.v28n1.66152>
 16. FORERO ULLOA, F.E.; CELY REYES, G.E.; PALACIOS PACHECO, L.S. 2015. Dinámica del páramo como espacio para la captura de carbono. *Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia UPTC (Tunja, Colombia)*. 144p.
 17. GONZÁLEZ-MOLINA, L.; ETCHEVERS-BARRA, J.D.; HIDALGO-MORENO, C. 2008. Carbon in hillsides soil: Factors that must be considered to determine its change over time. *Agrociencia*. 42(7):741-751.
 18. GUTIÉRREZ, J.; ORDOÑEZ, N.; BOLÍVAR, A.; BUNNING, S.; GUEVARA, M.; MEDINA, E.; OLIVERA, C.; OLMENDO, G.; RODRÍGUEZ, L.; SEVILLA, V.; VARGAS, R. 2020. Estimación del carbono orgánico en los suelos de ecosistema de páramo en Colombia. *Ecosistemas*. 29(1):1855.
<https://doi.org/10.7818/ECOS.1855>
 19. INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES, IDEAM; PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL DESARROLLO, PNUD; MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE, MADS; DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN, DNP; CANCELLERÍA. 2017. Tercera comunicación nacional de Colombia a la convención marco de las naciones unidas sobre cambio climático (CMNUCC). Punto aparte. 37p.
 20. INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI, IGAC. 2018. Identificación de la hoja de ruta y procedimientos para la estimación del contenido de carbono orgánico en suelos de páramos y humedales. *Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt*. 150p.
 21. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, IPCC. 2020. El cambio climático y la tierra. Disponible desde Internet en: www.ipcc.ch
 22. LIS-GUTIÉRREZ, M.; RUBIANO-SANABRIA, Y.; LOAIZA-USUGA, J.C. 2019. Soils and land use in the study of soil organic carbon in Colombian highlands catena. *Auc Geographica*. 54(1):15-23.
<https://doi.org/10.14712/23361980.2019.2>
 23. MACDICKEN, K.G. 1997. A guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects. *Forest carbon monitoring program*. Winrock International Institute for Agricultural Development. 87p.
 24. MASCIANDARO, G.; MACCI, C.; PERUZZI, E.; DONI, S. 2018. Soil Carbon in the World: Ecosystem Services Linked to Soil Carbon in Forest and Agricultural Soils. In: García, C.; Nannipieri, P.; Hernandez, T. (eds.). *The Future of Soil Carbon*. Elsevier. p.1-38.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811687-6.00001-8>
 25. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE, MADS. 2015. Plan Nacional de Restauración: restauración ecológica, rehabilitación y recuperación de áreas disturbadas. *Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Bogotá, D.C., Colombia)*. 92p.
 26. MORALES RIVAS, M.; OTERO GARCIA, J.; HAMMEN, T.V.D.; TORRES PERDIGÓN, A.; CADENA VARGAS, C.E.; PEDRAZA PEÑALOZA, C.A.; RODRIGUEZ ERAZO, N.; FRANCO AGUILERA, C.A.; BETANCOURTH, J.C.; OLAYA OSPINA, É.; POSADA

- GILEDE, E.; CARDENAS VALENCIA, L. 2007. Atlas de páramos de Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (Bogotá, Colombia). 210p.
27. OLSON, K.R.; AL-KAISI, M.M. 2015. The importance of soil sampling depth for accurate account of soil organic carbon sequestration, storage, retention and loss. *Catena*. 125:33-37.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.10.004>
28. ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA, FAO. 2020. A protocol for measurement, monitoring, reporting and verification of soil organic carbon in agricultural landscapes – GSOC-MRV Protocol. FAO (Rome). 140p.
<https://doi.org/10.4060/cb0509en>
29. PADBHUSHAN, R.; KUMAR, U.; SHARMA, S.; RANA, D.S.; KUMAR, R.; KOHLI, A.; KUMARI, P.; PARMAR, B.; KAVIRAJ, M.; SINHA, A.K.; ANNAPURNA, K.; GUPTA, V.V.S.R. 2022. Impact of Land-Use Changes on Soil Properties and Carbon Pools in India: A Meta-analysis. *Frontiers in Environmental Science*. 9:794866.
<https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.794866>
30. PATIÑO, S.; HERNÁNDEZ, Y.; PLATA, C.; DOMÍNGUEZ, I.; DAZA, M.; OVIEDO-OCAÑA, R.; BUYTAERT, W.; OCHOA-TOCACHI, B.F. 2021. Influence of land use on hydro-physical soil properties of Andean páramos and its effect on streamflow buffering. *CATENA*. 202:105227.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105227>
31. QUICHIMBO, P.; TENORIO, G.; BORJA, P.; CÁRDENAS, I.; CRESPO, P.; CÉLLERI, R. 2012. Efectos sobre las propiedades físicas y químicas de los suelos por el cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo: páramo de Quimsacocha al sur del Ecuador. *Suelos Ecuatoriales*. 42(2):138-153.
32. RÜGNITZ, M.T.; CHACÓN, M.L.; PORRO, R. 2009. Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales. Centro Mundial Agroforestal, Consorcio Iniciativa Amazónica (Lima, Perú). 90p.
33. SALVO, L.; BAYER, C. 2014. Balance de Gases de Efecto Invernadero en suelos agrícolas de secano. *Cangüé*. 35:7-14.
34. STOCKMANN, U.; ADAMS, M.A.; CRAWFORD, J.W.; FIELD, D.J.; HENAKAARCHCHI, N.; JENKINS, M.; MINASNY, B.; MCBRATNEY, A.B.; DECOURCELLES, V.DE.R.; SINGH, K.; WHEELER, I.; ABBOTT, L.; ANGERS, D.A.; BALDOCK, J.; BIRD, M.; BROOKES, P.; CHENU, C.; JASTROW, J.D.; LAL, R.; LEHMANN, J.; O'DONNELL, A.G.; PARTON, W.J.; WHITEHEAD, D.; ZIMMERMANN, M. 2013. The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 164:80-99.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2012.10.001>
35. SYLVESTER, S.P.; HEITKAMP, F.; SYLVESTER, M.D.P.V.; JUNGKUNST, H.F.; SIPMAN, H.J.M.; TOIVONEN, J.M.; GONZALES INCA, C.A.; OSPINA, J.C.; KESSLER, M. 2017. Relict high-Andean ecosystems challenge our concepts of naturalness and human impact. *Scientific Reports*. 7(1):3334.
<https://doi.org/10.1038/s41598-017-03500-7>
36. THOMPSON, J.B.; ZURITA-ARTHOS, L.; MÜLLER, F.; CHIMBOLEMA, S.; SUÁREZ, E. 2021. Land use change in the Ecuadorian páramo: The impact of expanding agriculture on soil carbon storage. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*. 53(1):48-59.
<https://doi.org/10.1080/15230430.2021.1873055>
37. VISCONTI, F.; DE PAZ, J.M. 2017. Estimación de la capacidad potencial de secuestro y emisión de CO₂ de los suelos agrícolas de la Comunidad Valenciana. *Ecosistemas Revista Científica de Ecología y Medio Ambiente*. 26(1):91-100.
<https://doi.org/10.7818/ECOS.2017.26-1.15>
38. ZHANG, Z.; ZHOU, Y.; WANG, S.; HUANG, X. 2018. Estimation of soil organic carbon storage and its fractions in a small karst watershed. *Acta Geochimica*. 37(1):113-124.
<https://doi.org/10.1007/s11631-017-0164-4>
39. ZHU, G.; SHANGGUAN, Z.; DENG, L. 2021. Dynamics of water-stable aggregates associated organic carbon assessed from delta C-13 changes following temperate natural forest development in China. *Soil and Tillage Research*. 205:104782.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104782>
40. ZIMMERMANN, M.; MEIR, P.; SILMAN, M.R.; FEDDERS, A.; GIBBON, A.; MALHI, Y.; URREGO, D.H.; BUSH, M.B.; FEELEY, K.J.; GARCIA, K.C.; DARGIE, G.C.; FARFAN, W.R.; GOETZ, B.P.; JOHNSON, W.T.; KLINE, K.M.; MODI, A.T.; RURAU, N.M.Q.; STAUDT, B.T.; ZAMORA, F. 2010. No differences in soil carbon stocks across the tree line in the Peruvian Andes. *Ecosystems*. 13(1):62-74.
<https://doi.org/10.1007/s10021-009-9300-2>
41. ZÚÑIGA-ESCOBAR, O.; PEÑA-SALAMANCA, E.J.; TORRES-GONZÁLEZ, A.M.; CUERO-GUEPENDO, R.; PEÑA-ÓSPINA, J.A. 2013. Assessment of the impact of anthropic activities on carbon storage in soils of high montane ecosystems in Colombia. *Agronomía Colombiana*. 31(1):112-119.