

Fecha de recibido: 01-12-2024

Fecha de aceptado: 30-05-2025

DOI: 10.22490/21456453.8955

CAPTURA DE CARBONO EN SUELOS BAJO TRES COBERTURAS VEGETALES EN COMPLEJOS DE PÁRAMOS DE BOYACÁ

CARBON CAPTURE IN SOILS UNDER THREE PLANT COVERS IN THE BOYACÁ PÁRAMOS COMPLEXES

Jorge Augusto Vásquez González ¹

Germán Eduardo Cely Reyes ²

Pablo Antonio Serrano Cely ³

Citación: Vásquez, J. A., Cely, G. E. y Serrano, P. A. (2026). Captura de carbono en suelos, bajo tres coberturas vegetales en complejos de páramos de Boyacá. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 17(1), 183-219. <https://doi.org/10.22490/21456453.8955>

¹ Magister en Ciencias Agrarias, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia UPTC. Tunja-Colombia. jorgeavasquezg@gmail.com

² Doctor en Agrociencias, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia UPTC. Tunja-Colombia. german.cely@uptc.edu.co

³ Magíster en Ciencias Ambientales, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia UPTC. Tunja-Colombia. pablo.serrano@uptc.edu.co

RESUMEN

Contextualización: Los páramos son ecosistemas con una gran variedad ambiental y una serie de aspectos ecológicos importantes, para el desarrollo de capacidades aprovechables en función de los seres vivos, que están inmersos en los mismos, y que con las acciones antrópicas alteran las condiciones de sustentabilidad de los procesos sinérgicos naturales, los cuales son esenciales para la formación del páramo que genera gran cantidad de agua y logra la captura de carbono atmosférico, que disminuye el cambio climático.

Vacío de conocimiento: La diversidad de páramos en el país representa una oportunidad para avanzar en el estudio de la variabilidad en cuanto a la captura de carbono orgánico, respecto al uso de los suelos y coberturas vegetales, que son ecosistemas fundamentales para la supervivencia de la población, que resulta ser la misma causante de actividades que alteran las condiciones de los procesos de captura de carbono, cuyo estudio es esencial para ampliar el saber de las causas y efectos hacia el medio natural.

Propósito: Evaluar y determinar la variabilidad en cuanto a la captura de carbono orgánico respecto al uso de los suelos y coberturas vegetales presentes en tres sistemas de páramos: Iguaque Merchán, Guantiva-La Rusia y El Cocuy, ubicados en Boyacá, evaluando los cambios temporales de carbono orgánico, mediante la obtención de muestras de los suelos para la cuantificación y definición de la densidad aparente.

Metodología: Se establecieron parcelas de muestreo en tres zonas específicas (intervenida, en recuperación y no intervenida) dentro de las 500 hectáreas piloto designadas para este estudio. Se llevó a cabo un tipo de muestreos de suelo a dos niveles de profundidad (0-15 y 15-30 centímetros), para un posterior análisis de la cantidad de carbono orgánico en el laboratorio, aplicando un método de Walkley Black.

Resultados y conclusiones: Se obtuvieron resultados que indican que, de los tres complejos de páramos, el de Guantiva-La Rusia obtuvo los valores de carbono orgánico más altos, así: Recuperación (87,95, ton ha^{-1}C), Intervenida (95,03 ton ha^{-1}C) y No intervenida (144,93 ton ha^{-1}C). Para la parcela intervenida, el páramo de Iguaque, a un nivel de profundidad de 15 a 30 cm, tuvo el valor más alto, de 79,7 (ton ha^{-1}C). En cuanto a los páramos en recuperación, el de La Rusia obtuvo el promedio más alto de CO, con un valor de 87,2 ton ha^{-1}C a un nivel de profundidad de 15 a 30 cm. En cuanto a los contenidos de COS para los páramos no intervenidos, se determinó que el complejo con el nivel más bajo de almacenamiento es el de Iguaque-Merchán con datos de 25,18 ton. ha^{-1}C para la profundidad 0-15 cm y 40,36 ton. ha^{-1}C para la de 15-30. Esto evidenció los efectos nocivos producidos por las actividades antrópicas en un suelo de una biodiversidad de alta montaña, los cuales se identifican por ser sumideros importantes de carbono y agentes, que impiden la liberación de gas que producen efecto invernadero hacia la atmósfera.

Palabras clave: análisis de suelo, carbono orgánico del suelo, cobertura de suelos, pá-

ramos, recuperación de suelos, suelo de alta montaña.

ABSTRACT

Contextualization: The moors are ecosystems with a great environmental variety and a series of important ecological aspects for the development of exploitable capacities based on the living beings that are immersed in them, and that with anthropic actions alter the conditions of sustainability of the natural synergistic processes; which are essential for the formation of the moor that generates a large amount of water and achieves the capture of atmospheric carbon, which decreases climate change.

Knowledge gap: The diversity of moors in the country represents an opportunity to advance in the study of variability in terms of the capture of organic carbon with respect to the use of soils and plant covers, which are fundamental ecosystems for the survival of the population, which happens to be the same cause of activities that alter the conditions of the carbon capture processes, whose study is essential to expand the knowledge of the causes and effects on the natural environment.

Purpose: To evaluate and determine the variability in organic carbon capture in relation to the use of soils and vegetation cover present in three páramo systems: Iguaque Merchán, Guantiva la Rusia and Cocuy, located in Boyacá; evaluating temporal changes in organic carbon by obtaining soil samples to quantify and define bulk density.

Methodology: Sampling plots were established in three specific areas (intervened,

in recovery and non-intervened) within the 500 pilot hectares designated for this study. A type of soil sampling was carried out at two depth levels (0-15 and 15-30 centimeters) for a later analysis of the amount of organic carbon in the laboratory, applying a Walkley Black method.

Results and conclusions: The results obtained indicate that, of the three páramos complexes, Guantiva and La Rusia obtained the highest organic carbon values, as follows: Recovery (87.95 ton ha⁻¹C), Intervened (95.03 ton ha⁻¹C), and Non-intervened (144.93 ton ha⁻¹C). For the intervened plot, the Iguaque páramos at a depth of 15 to 30 cm had the highest value of 79.7 (ton ha⁻¹C). Regarding the páramos in recovery, La Rusia obtained the highest average CO with a value of 87.2 ton ha⁻¹C at a depth of 15 to 30 cm. Regarding SOC content for undisturbed páramos, the Iguaque-Merchán complex was found to have the lowest storage level, with data of 25.18 ton.ha⁻¹C for the 0-15 cm depth and 40.36 ton.ha⁻¹C for the 15-30 cm depth. This demonstrates the harmful effects produced by human activities on a high-mountain soil with a biodiversity, which are identified as important carbon sinks and agents that prevent the release of greenhouse gases into the atmosphere.

Keywords: Soil analysis, soil organic carbon, soil cover, moorlands, soil restoration, high mountain soil.

RESUMEN GRÁFICO



Complejos de páramo de:
Iguaque-Merchán, Guantiva-La Rusia y El Cocuy

• El de Guantiva -La Rusia obtuvo los valores de carbono orgánico más altos, así: En recuperación (87,95 $\text{ton ha}^{-1}\text{C}$), Intervenido (95,03 $\text{ton ha}^{-1}\text{C}$) y No intervenido (144,93 $\text{t.ha}^{-1}\text{C}$).

Resultados



• Los suelos de ecosistemas de alta montaña, los cuales se caracterizan por ser sumideros importantes de carbono y agentes.

Resultados



Metodología

Parcelas

• Se establecieron parcelas de muestreo en tres zonas (intervenida, en recuperación y no intervenida).

Area piloto

• 500 hectáreas piloto designadas para este estudio.

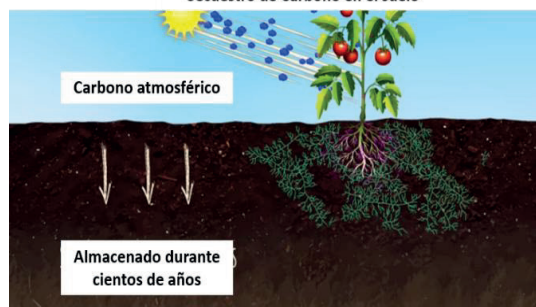
Toma de muestras

• Se llevó a cabo un muestreo de los suelos a dos niveles de profundidades (0 a 15 y 15 a 30 centímetros).

Análisis de laboratorio

• Análisis de la cantidad de carbono orgánico en el laboratorio, aplicando el método de Walkley Black.

Secuestro de Carbono en el suelo



<https://quimcasa.blog/2021/06/08/como-se-almacena-el-carbono-en-el-suelo/>

Toma de Muestras



1 INTRODUCCIÓN

Los sistemas de páramos “son ecosistemas naturales primordiales en el ciclo hídrico y la captura de carbono en el suelo, por el tipo de vegetación y los suelos de las zonas de alta-montaña, están relacionadas con una importante provisión de servicios ecosistémicos” (Eze et al., 2018a; 2018b; Pérez y Rodríguez, 2019); pero “se conoce que las actividades agrícolas y pecuarias han llevado a cambios progresivos en los parámetros físicos, químicos y agotamiento del carbono orgánico (CO) y nitrógeno del suelo, contribuyendo a la pérdida de calidad edáfica e incrementando las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)” (Gómez-Balanta y Ramírez-Nader, 2022), lo cual afecta el medio ambiente.

El cambio climático tiene efectos negativos en los procesos ecológicos, económicos y sociales que interactúan en la tierra (Ruiz et al., 2019). El cambio climático es inducido, principalmente, por gases de efecto invernadero como el metano, el óxido nitroso y el dióxido de carbono (CO_2), los cuales provocan el incremento de la concentración en la atmósfera. En lo que respecta a los contenidos de carbono atmosférico, estos se han incrementado principalmente por dos actividades humanas: el cambio de uso de la tierra y la combustión de fósiles (Cuervo, 2019).

En el contexto del secuestro de carbono, el derecho al futuro se relaciona con la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero para limitar el cambio climático y proteger el medio ambiente para las generaciones futuras. El secuestro de carbono se refiere a la captura y almace-

namiento de CO_2 de la atmósfera, con el fin de reducir las emisiones y mitigar los efectos del cambio climático (Pinilla y Pareja, 2023).

El CO_2 es uno de los gases de efecto invernadero (GEI) impulsores del cambio climático, sus emisiones hacia la atmósfera son tanto de origen natural como antrópico). En este sentido, el cambio de uso del suelo y la silvicultura representaron el 6,3 % (46,9 millones de toneladas de CO_2) de las emisiones totales (Luna et al., 2023). La cantidad de COS no solo depende de las condiciones ambientales locales, sino que también es afectada fuertemente por el manejo del suelo. Existen prácticas de manejo que generan un detrimento del COS en el tiempo, a la vez que hay prácticas que favorecen la acumulación (Flóres y Calderón, 2021).

No se cuenta con información detallada sobre los almacenes de carbono por tipo de ecosistema y uso del suelo ni de los flujos netos de carbono derivados de los patrones de cambio de uso del suelo a nivel regional (Aburto, 2022). Las transformaciones en el uso del suelo resultan propulsoras del cambio global y de impactos ambientales asociados con la provisión de servicios ecosistémicos vinculados al recurso edáfico. El cambio de uso de la tierra afecta fuertemente el *stock* de carbono orgánico del suelo, fuerza fundamental para la calidad y los servicios del suelo (Somoza y Vásquez, 2023), por lo que los sistemas agroforestales proveen bienes ecosistémicos, tal como la mitigación del cambio climático al capturar carbono en biomasa (Andrade et al., 2018).

Los suelos del páramo generalmente están compuestos de una gran cantidad de carbono orgánico, lo cual se da a temperaturas bajas que minimizan la descomposición de la materia orgánica, que se ha venido acumulando durante largos periodos de tiempo. El principal objeto de estos suelos es regular los niveles de CO_2 emitidos de manera atmosférica por intervenciones antrópicas y así conlleva a la realización ecosistémica para un aporte favorable al ámbito climático a nivel global, actuando como fuente mas no como vertedero (Pinos-Morocho et al., 2021). Dichos servicios ecosistémicos, aunados con los análisis llevados a cabo en la presente investigación, tienen como objetivo fundamental ayudar a la conservación de

los suelos de la alta montaña. Sin embargo, es relevante indicar que “en la última década los ecosistemas de páramo ubicados en zonas de alta montaña han forjado una intensiva degradación como consecuencia de la pérdida parcial o total de la cobertura vegetal” (Vargas, et al., 2022).

Por lo anterior, el objetivo del estudio es determinar la captura de carbono en suelos de tres coberturas vegetales en los complejos de páramos de Boyacá, como el de Iguaque-Merchán, Guantiva-La Rusia y El Cocuy, evaluando los cambios temporales de carbono orgánico (CO), mediante la obtención de muestras de los suelos para la cuantificación y definición de la densidad aparente (ρ_b).

2 MATERIALES Y MÉTODOS

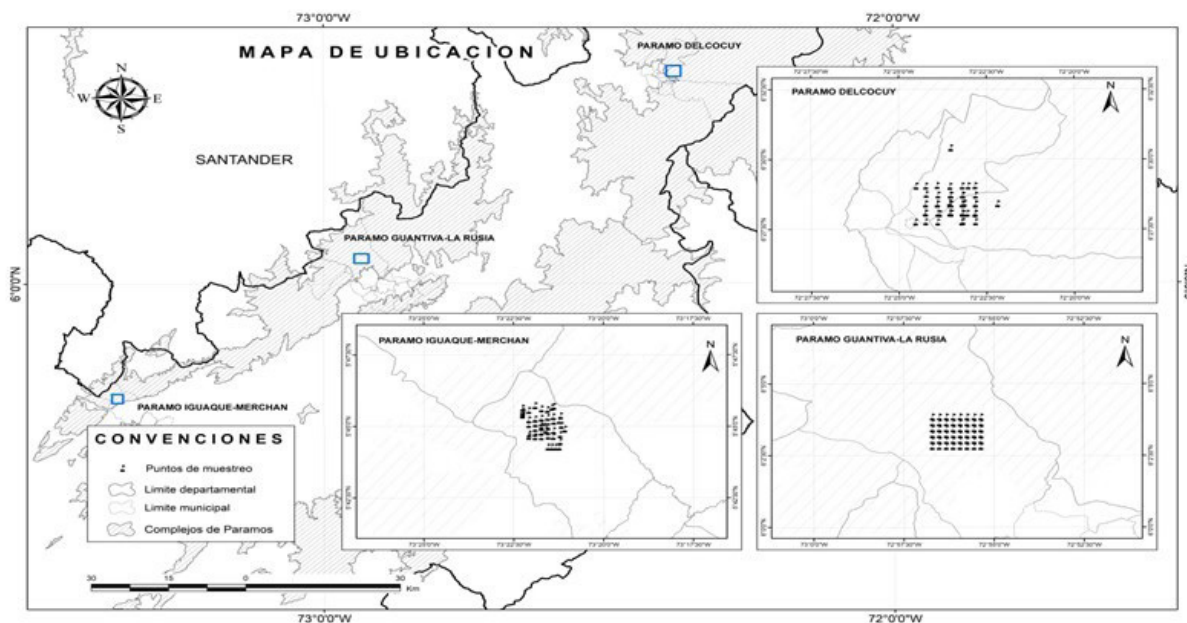


Figura 1. Lugar geográfico de los páramos de Iguaque-Merchán, Guantiva-La Rusia y El Cocuy.

Fuente: elaboración propia

Área de estudio. El estudio fue realizado en los complejos de páramo de Iguaque-Merchán, Guantiva-La Rusia y El Cocuy, ubicados como se muestra en la figura 1.

Sitios de muestreo y obtención de muestras. Los complejos de páramo en Boyacá tienen un área piloto de 500 hectáreas (has) en cada uno. Dichos ecosistemas se ubican en la cordillera Oriental en los municipios de Arcabuco, Belén y Guicán, con alturas entre los 3000 y los 5400 m s. n. m. Con el propósito de realizar la obtención de muestras de los suelos para la cuantificación de carbono orgánico (CO) y densidad denominada aparente (ρ_b), fueron escogidos 48 puntos de muestreo para cada complejo de páramo, distribuidos de manera equidistante en las 500 has piloto designadas por la Corporación Autónoma de Boyacá. También se definieron tres zonas permanentes para realizar

la obtención de muestras, con el objetivo de evaluar cambios temporales de carbono orgánico (CO), obteniendo de esta manera datos confiables y verificables. Es importante indicar que el complejo de páramo de Guantiva-La Rusia es de tipo de frailejones; el páramo de Iguaque-Merchán y el de El Cocuy son de tipo herbáceo o pajonal.

La definición de las parcelas se llevó a cabo después del reconocimiento y muestreo total de los 48 puntos del área piloto, en donde se logró identificar las tres zonas, cada cual con una dimensión de $10 \times 10 \text{ m}^2$, tal como se indica en la figura 2, en cuyos sitios se recolectaron de los suelos intervenidos algunas muestras, en recuperación o intervenido, teniendo en cuenta cuáles son los usos de los suelos y las coberturas vegetales, tal como se observa en las figuras 3, 4 y 5.

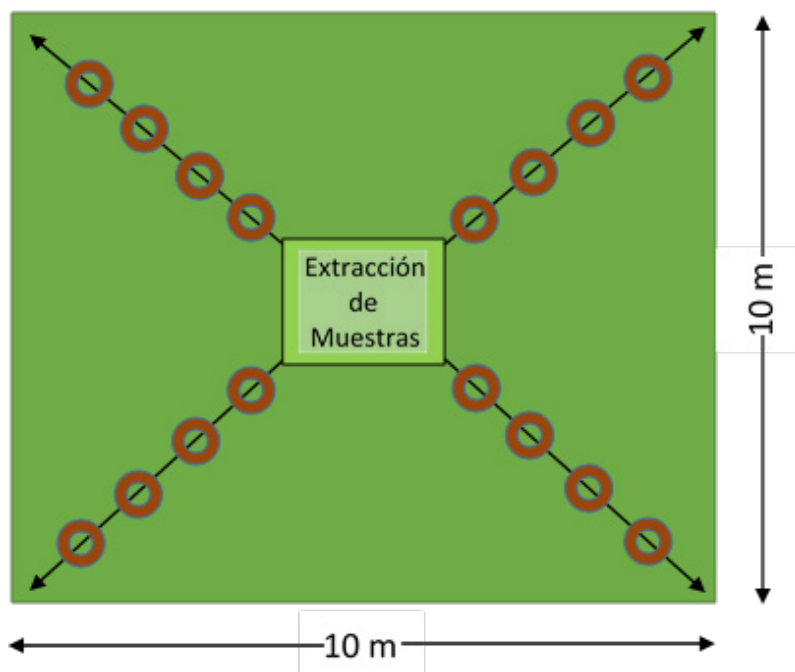


Figura 2. Diseño de PPM y obtención de muestras para densidad aparente y carbono orgánico

Fuente: elaboración propia



Figura 3. PPM área no intervenida, en el páramo de El Cocuy

Fuente: elaboración propia



Figura 4. PPM área en recuperación, complejo de páramo de Iguaque-Merchán

Fuente: elaboración propia



Figura 5. PPM área en intervenida, complejo de páramo de Guantiva-La Rusia

Fuente: elaboración propia

Las PPM se implementaron para determinar cómo es la dinámica del carbono orgánico (CO) en los tres escenarios de cada uno de los tres complejos de páramo evaluados, lo anterior con el objetivo de conocer cómo es el efecto de la intervención antrópica en cada una de las zonas de investigación.

La obtención de muestras de los suelos para la cuantificación de carbono orgánico (CO) fue llevada a cabo por medio de la barrenada de muestreo en 8 puntos de cada una de las PPM. La muestra de los suelos para apreciar la densidad aparente fue tomada en aquellos mismos sitios en los que se realizó la extracción de las muestras de carbono orgánico (CO), utilizando para esto la apertura de una cajuela con dimensiones de 50 x 50 x 50 cm por sitio e implementando el método del anillo con volumen conocido, tomando así dos muestras, una de 0 a 15 cm y otra de 15 a 30 cm en profundidad.

Lo anterior, sustentado en lo descrito sobre levantamiento y caracterización técnica sobre suelos al respecto de las dimensiones de las cajuelas de muestra de campo por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC (2021), que hace relación a la excavación de forma cúbica que se realiza en el suelo para identificar las características morfológicas, y además que a partir de 50 cm se realiza un barrenaje hasta 1,20 m.

Obtenidas las muestras de los suelos en campo y rotuladas con la información respectiva, son conducidas al Laboratorio de Suelos y Aguas de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, en donde se realizó el análisis al carbono orgánico (CO), implementando el procedimiento de oxidación húmeda

de Walkley y Black (1934), que ha sido adoptado al requerir poca demanda de equipos, sumándose a esto la simplicidad y bajo costo (Izquierdo y Arévalo, 2021), relacionando que “influye en las características físicas, químicas y biológicas del suelo como agente que interviene en la infiltración, suministro y retención de humedad y relacionado con la presencia de diferentes grupos de microorganismos que ayudan a mineralizar la materia orgánica” (Pardo-Plaza et al., 2019).

Contenido de carbono orgánico. La captura o almacenamiento de C de acuerdo con Ramos et al. (2018) se refiere la actividad acumulativa en las diversas coberturas de vegetación en los suelos, según el uso, el cual permanece acumulado “in situ o transformado en productos que no liberan este C una vez más a la atmósfera a lo cual se le conoce como sumideros de carbono”.

Parcela permanente de muestreo intervenida. Burbano (2018) indica que

los contenidos del COS tienden a disminuir con la profundidad. A la vez, los cambios más fuertes en la reserva de carbono en el suelo obedecen a las modificaciones en la cobertura terrestre y tienen lugar en los primeros 20-30 cm.

Cálculo de carbono orgánico del suelo (COS). Según Toledo y Lazo (2021), de acuerdo con la densidad aparente (pb), materia orgánica y el contenido de carbono orgánico (CO), se realiza la determinación en toneladas del contenido de carbono acumulado en los suelos, el cual es definido a partir de la suma del carbono secuestrado de los horizontes de los complejos. En la investigación se empleó la ecuación 1:

$$COS = C \times \rho_b \times T \times (1 - \text{frag}) \times 10 \quad (1)$$

donde:

COS = contenido de carbono orgánico del suelo ($\text{ton ha}^{-1}\text{C}$)

C = concentración de carbono orgánico del suelo obtenido en laboratorio

ρ_b = densidad aparente del suelo (g/cm), masa de suelo por volumen

T = espesor de la capa del suelo expresado en términos de metros

FG = contenido de fragmentos

Obs = el multiplicador final 10 se usó para convertir las unidades en $\text{ton ha}^{-1}\text{C}$. (Fernández et al, 2019)

En cuanto a la medición del contenido de fragmentos, se indica que el tiempo que toma la estimación de la fragmentación de un suelo es extenso al considerarse muy compleja, por lo tanto, en una gran cantidad de inventarios de suelos esto no se lleva a cabo, o en determinados casos la fragmentación se estima visualmente en el perfil (Secretaría AMS y GTIS de la FAO, 2016). Es recomendable determinar la pedregosidad de manera exacta cuando los fragmentos de roca predominan en el volumen total de la muestra en lugar de utilizar valores constantes (suelos con mayores profundidades) y de esta manera reducir los errores de medición (Lorenz y Lal, 2016).

De acuerdo con la FAO, para determinar el contenido de fragmentos en el suelo se deben identificar y clasificar las partículas según el tamaño y origen, atribuyendo a esto la degradación de la estructura del suelo y la incapacidad para capturar carbono. Debido a la génesis de los suelos estudiados en esta investigación, no presentan fragmentos dentro del perfil y en algunos casos existe poco

desarrollo pedogenético al ser suelos jóvenes (FAO, 2017).

Carbono orgánico equivalente del suelo (COe). “Esta cuantificación se relaciona con la capacidad que tiene el suelo para secuestrar o liberar CO_2 . Una tonelada de carbono equivale a 3,67 toneladas de CO_2 ” (Oliveira et al., 2022), lo cual se deriva de la “relación 44/12 que proviene de la relación estequiométrica de pesos moleculares con la finalidad de conocer cuánto CO_2 puede originarse por la descomposición del carbono orgánico (CO)” (Pinos-Morocho et al., 2021) para conocer el contenido de CO_2 almacenado o emitido de carbono de una captura determinada, lo cual debe multiplicarse por 3,67.

Análisis estadístico. se realizaron pruebas de cumplimiento de supuestos estadísticos denominado de normalidad (prueba Shapiro Wilk), homocedasticidad (prueba de Bartlett) y el análisis de la varianza (ANOVA), posteriormente se realizó una prueba con la que se compararon los promedios de Tukey, utilizando un nivel de significancia de 0,05. Lo anterior se llevó a cabo en el programa esta-

dístico R versión 4.4.1 y la interfase Rstudio. El diseño experimental fue completamente al azar con arreglo factorial 3x2, el primer factor corresponde al complejo de páramos

y el segundo a las profundidades del suelo, las gráficas que se presentan están de forma independiente para cada uno de los factores.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se logró establecer en cuanto a la cobertura de la vegetación de las zonas de estudio, al respeto del complejo de Páramos de Guantiva-La Rusia, tal como lo referencia la Corporación Autónoma Regional de Boyacá (2025a) que está ubicado en el departamento de Boyacá, en la cordillera Oriental entre 3100 y 4335 (m s. n. m.) por lo que cuenta con una variedad de hábitats de diversas especies, regula el clima, el aire y genera bienes paisajísticos, que presentan beneficios importantes, debido a que se tienen bosques, en donde hay captura del carbono y producción de oxígeno.

En cuanto al páramo de El Cocuy, se encuentra en la cordillera Oriental, con cerca de 306 000 hectáreas, en cuya cobertura vegetal se tiene la presencia de frailejones, cardones y bosques altoandinos que son esenciales para la captura de carbono y la regulación de agua. La otra zona de estudio es el páramo de Iguaque-Merchán, que se encuentra en el departamento de Boyacá, con ecosistemas que prestan una serie de servicios a los habitantes, como provisión hídrica y captura de carbono, con una cobertura vegetal de tipo herbáceo o pajonal (Parques Nacionales de Colombia, 2025).

En estas zonas de estudio del complejo de páramos de Boyacá, se realizaron los análisis con los que se determinaron las cantidades de carbono en los diversos almacenes, mediante la evaluación realizada, cuyos resultados se muestran en la figura 6, en la cual se utilizaron letras minúsculas para identificar las columnas con resultados de las profundidades de 0 a 15 cm y las mayúsculas para las profundidades de 15 a 30 cm y, al evaluar cada factor de forma independiente, las letras se reportan en minúscula debido a que se está presentando estadística para cada uno de los factores estudiados. Esta letras mayúsculas y minúsculas se utilizaron también en las demás figuras presentadas en los resultados del análisis.

En cada interpretación de las variables se reportó que el valor de P era menor al nivel de significancia de 0,05 (el valor de $P < 0,05$) lo que indica que hubo diferencias estadísticas significativas y en el caso del valor de $P > 0,05$ se indica que no hubo diferencias significativas, por lo que no se ve la necesidad de reportar los valores de P; sin embargo, a continuación se describen estos valores, que son los siguientes: CO valor de $P = 2,2e-16$, COS p valor $= 1,382e-11$ y COSe valor de $P = 2,2e-16$

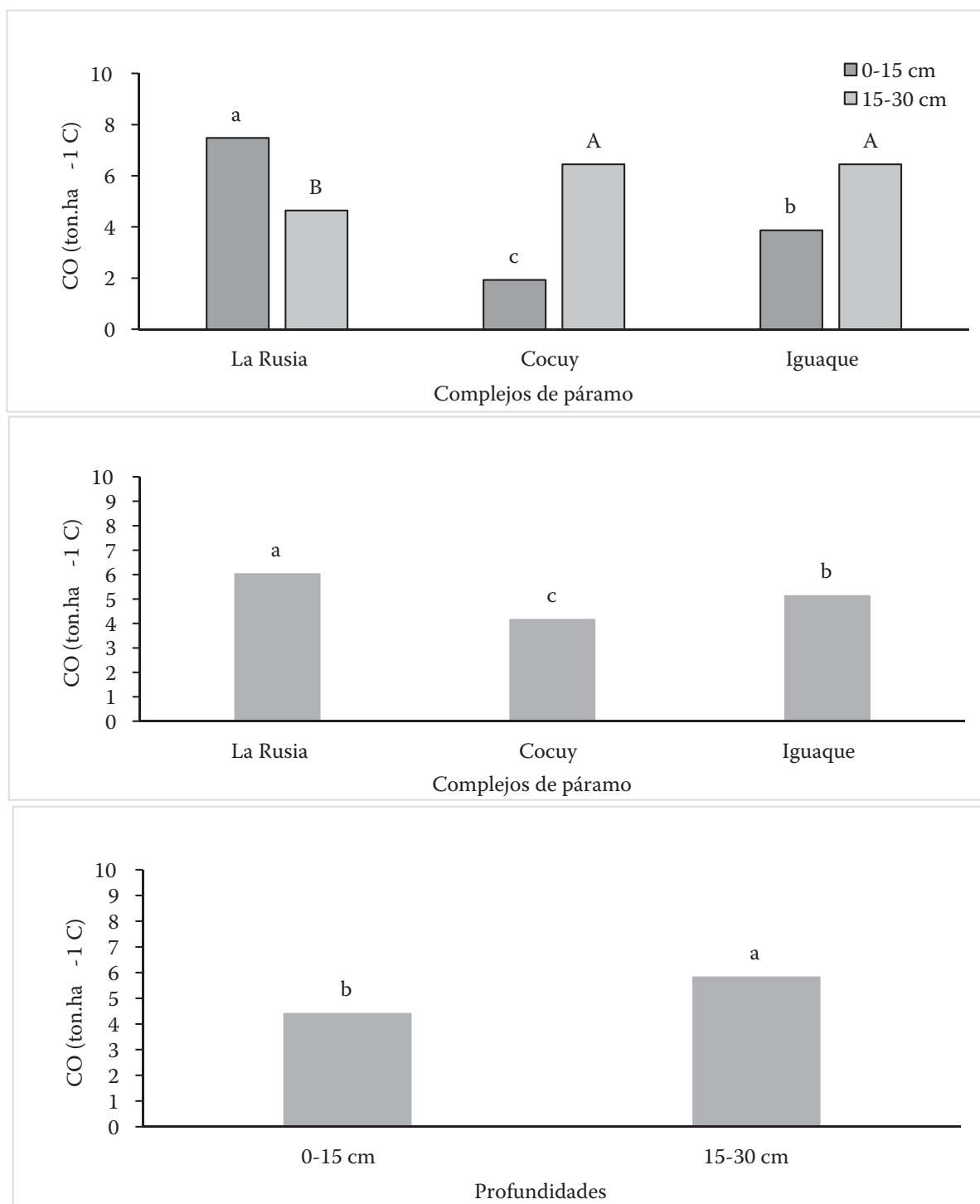


Figura 6. Contenido de carbono orgánico (ton ha⁻¹C) en PPM intervenida a dos niveles de profundidad (0 a 15 y 15 a 30 cm) en el suelo de los tres páramos

Fuente: elaboración propia

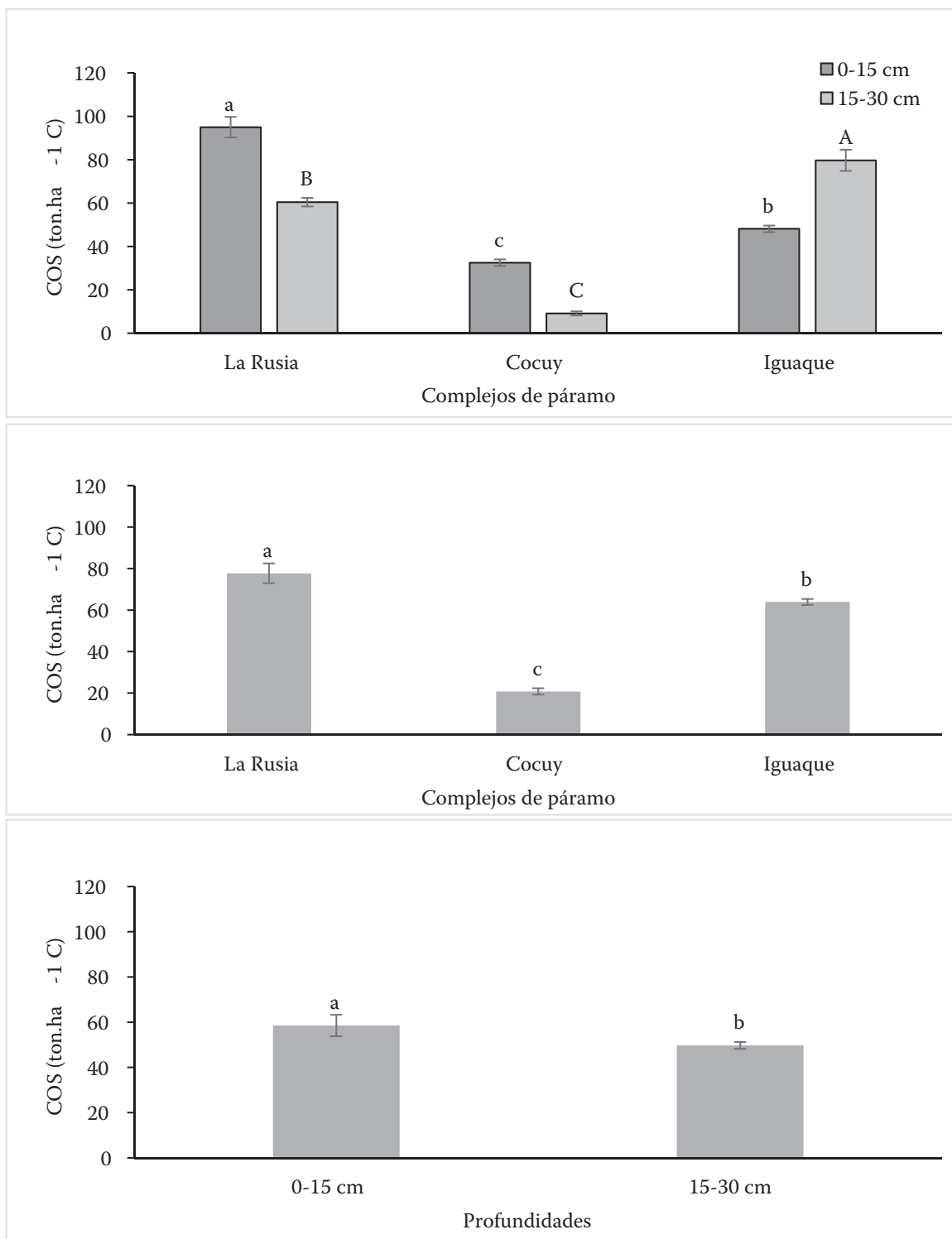


Figura 7. COS ($\text{ton ha}^{-1}\text{C}$) en PPM intervenida a dos niveles de profundidad (0 a 15 y 15 a 30 cm) de los suelos de los tres páramos

Fuente: elaboración propia

Con respecto de la figura 6 se muestra que hubo diferencias estadísticas significativas en cada uno de los complejos de páramo y a diferentes profundidades (valor de $P= 2,2e-16$), donde el complejo La Rusia presentó un mayor promedio de carbono orgánico a una profundidad de 0 a 15 cm, con un 7,48 (ton $ha^{-1}C$), seguido del páramo de El Cocuy a un nivel de profundidad de 15 a 30 cm con un 6,45 (ton $ha^{-1}C$), pero en el cual también se evidencia que presenta un menor valor de contenido de carbono orgánico (CO) a una profundidad de 0 a 15 cm, con 1,93 (ton $ha^{-1}C$).

En la figura 7 se muestra que hubo diferencias estadísticas significativas en cada uno de los complejos de páramo y a diferentes profundidades (valor de $P= 1,382e-11$). Para el COS en parcela intervenida se definieron estadísticas características entre los complejos de páramo donde La Rusia obtuvo el mayor promedio a un nivel de profundidad de 0 a 15 cm, con un valor de 6,45 (ton $ha^{-1}C$), seguidos del páramo de Iguaque a un nivel de profundidad de 15 a 30 cm, con un valor de 79,7 (ton $ha^{-1}C$), mientras que en el páramo de El Cocuy se reportaron los valores más bajos de COS, a un nivel de profundidad de 0 a 15 cm con un valor de 32,5 (ton $ha^{-1}C$), y de 15 a 30 cm con un valor de 9,07 (ton $ha^{-1}C$) (Figura 7).

El “COS es un componente importante del ciclo global del C, ocupando un 69,8 % del C orgánico de la biósfera” (Fonseca-Vargas et al., 2019). La labranza del suelo hace parte del manejo agronómico, y esto lleva a que el carbono, “mediante el laboreo tradicional está sufriendo pérdidas de entre 1/3 y la mitad del carbono total del suelo. Esta pérdida ocurre por la fragmentación que origina la labranza” (Ortiz, 2022), “por tanto, si se

tiene una cubierta vegetal con un contenido de especies variado se logrará una mayor captura de carbono” (Winter et al., 2018). Se establecieron cuatro rangos como niveles de almacenamiento de carbono orgánico (CO) en el suelo y fueron los siguientes: “Muy Alto ($>150 \text{ Mg } ha^{-1}$), Alto ($100-150 \text{ Mg } ha^{-1}$), Medio ($50-100 \text{ Mg } ha^{-1}$) y Bajo ($<50 \text{ Mg } ha^{-1}$)” (Vargas-Larreta et al., 2023).

En la figura 7 se puede apreciar el bajo acumulado de COS ton. $ha^{-1}C$ en la PPM intervenida del complejo de páramos de El Cocuy. Con valores de 32,50 y 9,07 ton. $ha^{-1}C$ a niveles de profundidad entre 0 a 15 y 15 a 30 cm, equitativamente, situándose en el nivel de almacenamiento bajo y mostrando una diferencia significativa con relación a los valores arrojados para complejos de Iguaque-Merchán (48,14 y 79,44 ton. $ha^{-1}C$) y Guantiva-La Rusia (95,03 y 60,41 ton. $ha^{-1}C$), los cuales se encuentran en un nivel de almacenamiento de carbono medio.

Lo anterior se puede atribuir a las diferentes prácticas agrícolas y ganaderas que se realizan en esta zona. En la transición del uso de los suelos, de un sistema nativo a cultivos, se disminuye el carbono orgánico (CO) y los nutrientes, con el consecuente deterioro del suelo (Ramírez et al, 2023). “Debido a que el carbono orgánico (CO) del suelo se relaciona con la sustentabilidad de los sistemas agrícolas, y en el contenido incide el manejo del suelo, se han desarrollado diversas prácticas que permitan favorecer el almacenamiento” (Zamora-Morales, 2020), “porque algunas formas del carbono orgánico (CO) del suelo son más frágiles o sensibles al manejo y la labranza” (Bongiorno et al., 2019).

Parcela permanente de muestreo en recuperación

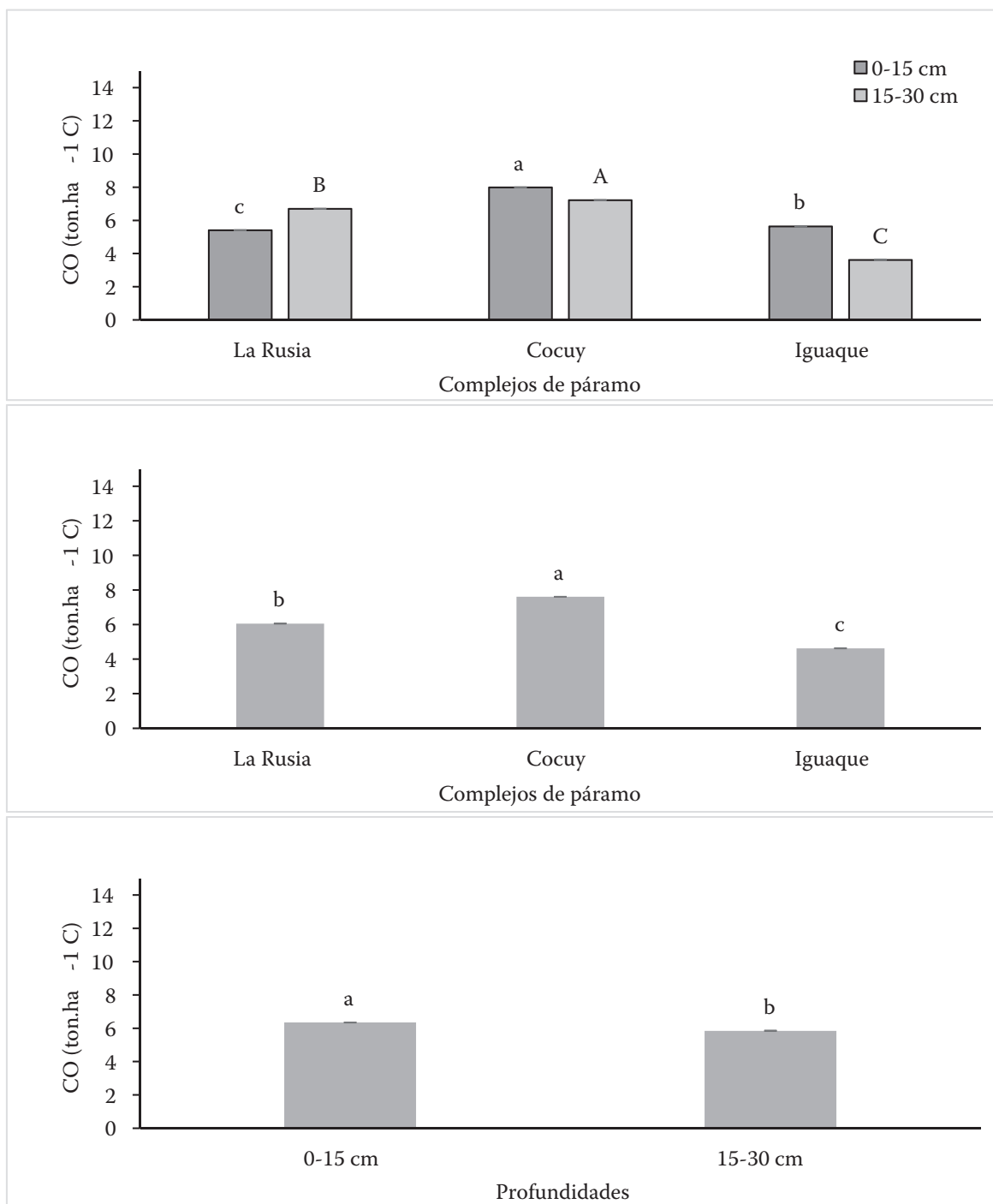


Figura 8. Contenido de carbono orgánico ($\text{ton ha}^{-1}\text{C}$) en PPM en recuperación a dos niveles de profundidad (0 a 15 y 15 a 30 cm) de los suelos de los tres páramos

Fuente: elaboración propia

El acumulado de carbono orgánico (CO) presentó diferencias estadísticas significativas, donde el mayor promedio se encontró a un nivel de profundidad de 0 a 15 cm, con un 7,99 (ton ha⁻¹C) en el complejo de páramo de El Cocuy, seguido de una profundidad de 15 a 30 cm, con 7,22 (ton ha⁻¹C), en este mismo complejo de páramo. Así mismo, se muestra que el menor promedio de carbono orgánico (CO) está en el complejo del páramo de Iguaque a nivel de profundidad de 15 a 30 cm, con 3,61 (ton ha⁻¹C) (Figura 8).

El contenido de carbono orgánico (CO) (ton.ha⁻¹C) en la PPM en recuperación en los complejos evaluados, a diferencia de la PPM intervenida, muestran unos valores importantes para El Cocuy, como se observa en la figura 8, siendo este el de mayor contenido de carbono orgánico (CO) en este escenario en cada una de las dos profundidades estudiadas, arrojando valores de 7,99 ton.ha⁻¹C de 0 a 15 cm y 7,22 ton.ha⁻¹C de 15 a 30 cm. Para los sistemas de páramos de Iguaque-Merchán y Guantiva-La Rusia los valores de contenido de carbono orgánico (CO) en ton.ha⁻¹C para la profundidad de 0 a 15 cm fueron de 5,64 y 5,41 ton.ha⁻¹C, mientras que para la profundidad de 15 a 30 cm se encontraron datos de 3,61 y 3,70 ton.ha⁻¹C, respectivamente. Siendo menores los contenidos de carbono orgánico (CO) para estos dos últimos complejos, se logró definir que no se encuentran diversas significativas en los tres complejos evaluados.

“El COS corresponde al ingreso de CO₂ de la atmósfera al suelo a través de plantas, residuos de plantas y otros sólidos orgánicos

que se almacenan o se retienen en el suelo como parte de la materia orgánica del suelo” (Mondragón et al., 2022), “convirtiendo al COS en un indicador clave de la calidad en términos agrícolas y ambientales” (Tfaily et al., 2017). “Por lo que, la captura de COS es una posible oportunidad adicional para contrarrestar, en parte, el aumento de las concentraciones atmosféricas de CO₂” (Rumpel et al., 2020).

Hubo diferencias estadísticas significativas en el acumulativo de carbono orgánico (CO) de los suelos para cada uno de los niveles de profundidad de los complejos de páramo, donde el páramo de La Rusia obtuvo el promedio más alto, con un valor de 87,2 ton.ha⁻¹ a un nivel de profundidad de 15 a 30 cm, cuyos resultados como lo indican Andrade et al. (2018) demuestran la importancia de estos sistemas como mitigadores del cambio climático, y en esta misma profundidad en el páramo de Iguaque se obtuvo un menor valor, con 44,7 ton.ha⁻¹ (Figura 9).

En la figura 9 se muestran los resultados definidos en los sistemas de páramos de Iguaque-Merchán, Guantiva-La Rusia y el complejo de El Cocuy para el contenido de COS en las PPM en recuperación que, de acuerdo con Eichhorn et al., (2018) “permite de alguna manera llevar a prevenir los efectos del cambio climático, por lo que se debe adaptar a los efectos que pueden ser definitivos”. En la profundidad de 0 a 15 cm, no se encontraron diferencias significativas en cuanto a los contenidos de COS ton.ha⁻¹C, mostrando valores de 71,00, 68,73 y 78,10 (ton ha⁻¹C), respectivamente.

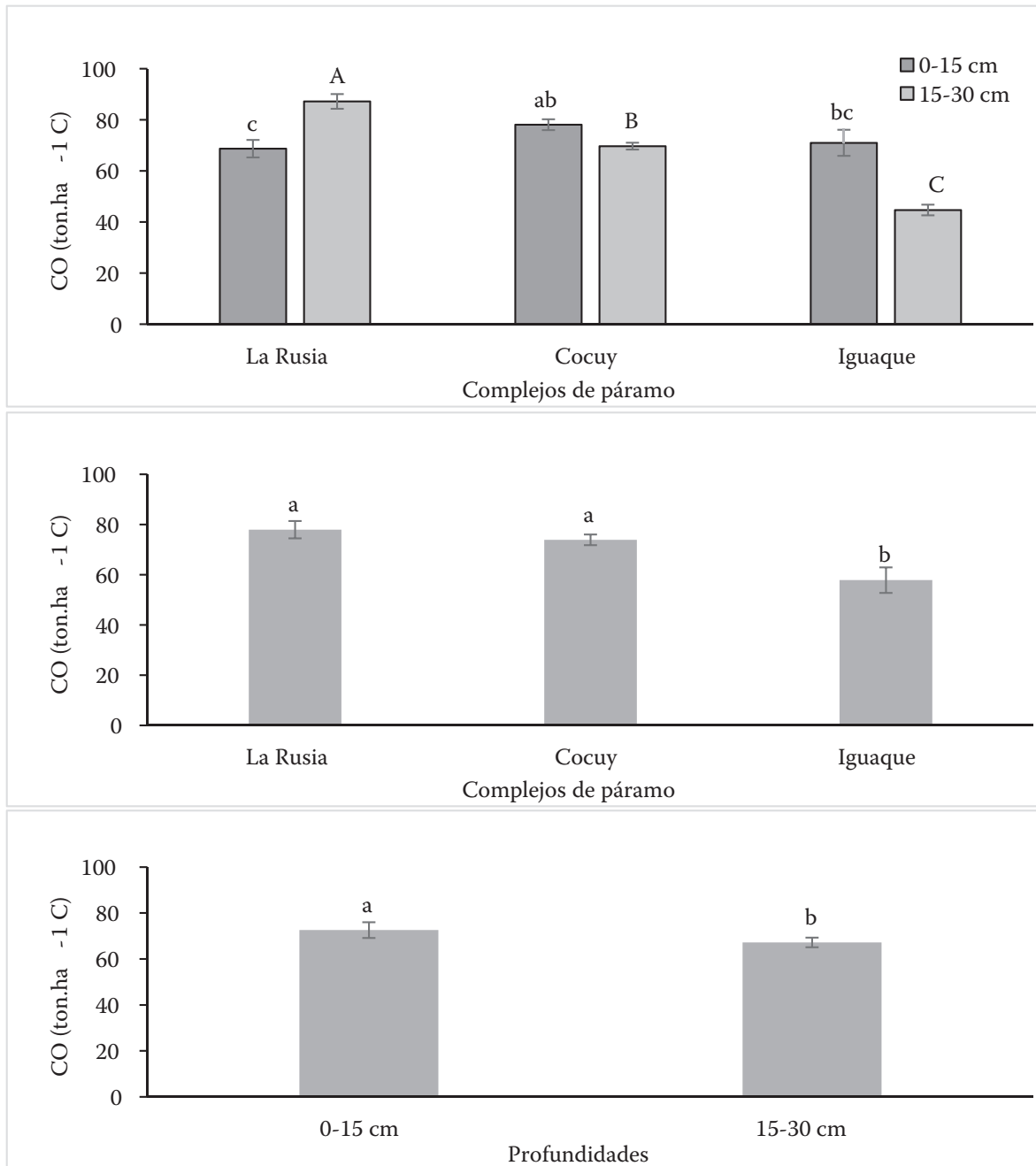


Figura 9. COS (ton ha⁻¹C) en PPM en recuperación a dos niveles de profundidad (0 a 15 y 15 a 30 cm) de los suelos de los tres complejos de páramo

Fuente: elaboración propia

A nivel de profundidad de 15 a 30 cm se muestra que existe una diversidad significativa en el valor más bajo (44,71 ton.ha⁻¹C),

correspondiente al complejo de páramos de Iguaque-Merchán y los valores obtenidos en los sistemas de Guantiva-La Rusia y

el complejo de El Cocuy, en donde los datos arrojados fueron 87,23 y 69,69 $\text{ton} \cdot \text{ha}^{-1}\text{C}$ respectivamente. Todos los resultados de COS obtenidos en la PPM en recuperación para los tres complejos se encuentran ubicados en el nivel de almacenamiento de carbono medio, excepto el arrojado por el complejo de Iguaque-Merchán en la profundidad de 15 a 30 cm.

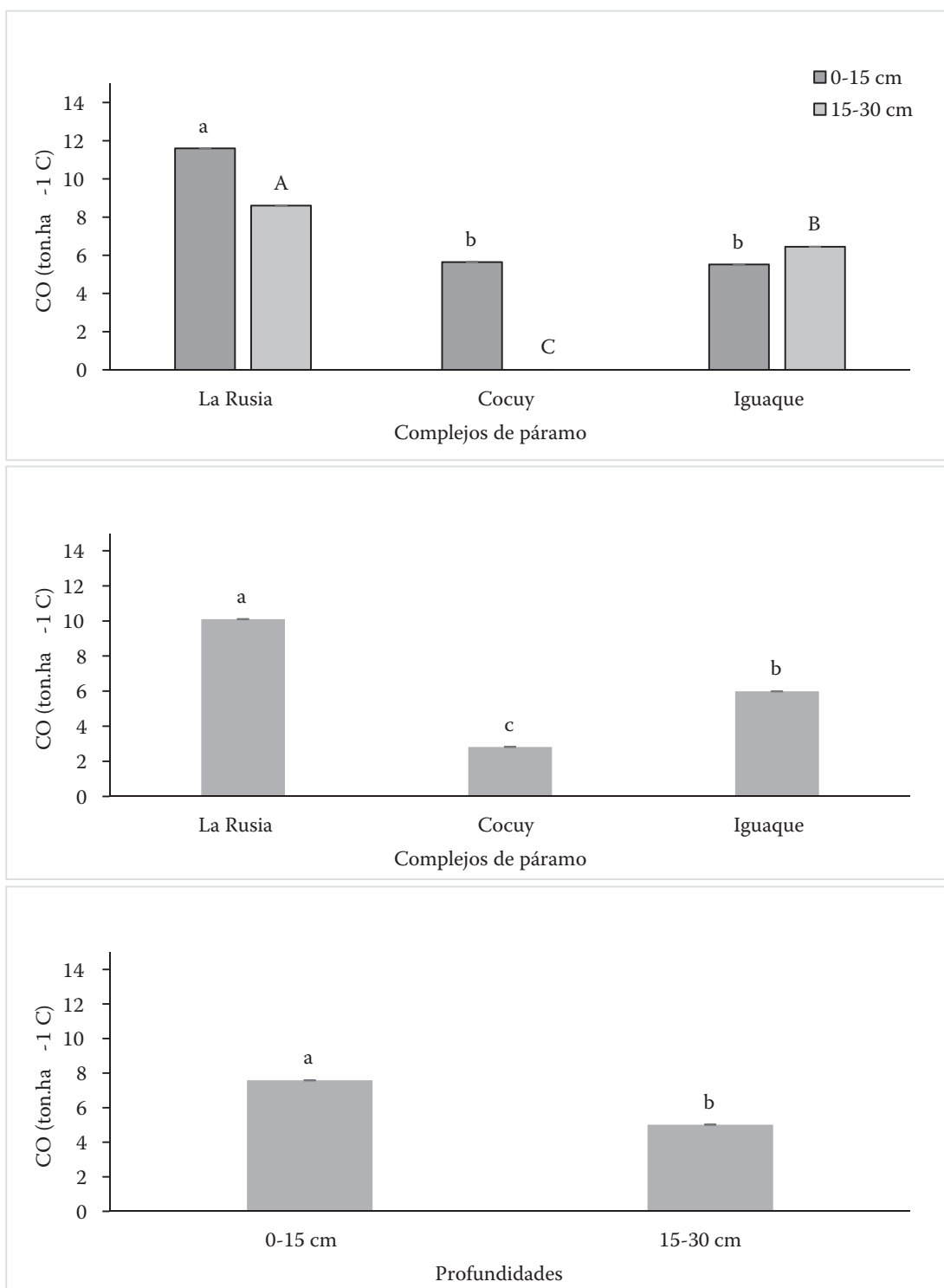
Respecto a las dos profundidades evaluadas, se muestra que en los sistemas de páramos de Iguaque-Merchán y el complejo de El Cocuy, el contenido de COS $\text{ton} \cdot \text{ha}^{-1}\text{C}$ es mayor en la profundidad de 0 a 15 cm que el obtenido entre los 15 y 30 cm de profundidad. Lo anterior corrobora lo estudiado por Walteros-Torres et al. (2022) en el sistema de Sumapaz, en donde el contenido de COS determinó mayores valores en el horizonte superficial (0 a 25 cm), y en el caso de 20-45 cm de profundidad fue menor.

Parcela permanente de muestreo no intervenida

El páramo de La Rusia presentó mayores promedios de contenido de carbono para los niveles de profundidad (0 a 15 cm y 15 a

30 cm), con un 11,6 ($\text{ton} \cdot \text{ha}^{-1}\text{C}$) y con un 8,6 ($\text{ton} \cdot \text{ha}^{-1}\text{C}$), respectivamente, que frente a los páramos de El Cocuy y de Iguaque (P valor $<0,07$); además, se pudo observar que el menor contenido de carbono orgánico (CO) a un nivel de profundidad de 0 a 15 cm se determinó en el páramo de Iguaque y para el nivel de profundidad de 15 a 30 cm se dio en el páramo de El Cocuy (Figura 10).

En la figura 10 se observan los contenidos de carbono orgánico (CO) en la PPM no intervenida para los tres de páramos investigados en este estudio. Las estadísticas, en cuanto al complejo de Guantiva-La Rusia, muestran un resultado diferente a nivel de profundidad de 0 a 15 cm con un valor de 11,61 $\text{ton} \cdot \text{ha}^{-1}\text{C}$, con relación a los sistemas del páramo de Iguaque-Merchán y el complejo de El Cocuy, en los cuales se observan valores de 5,52 y 5,64 $\text{ton} \cdot \text{ha}^{-1}\text{C}$ para la misma profundidad, sin presentar diferencias significativas entre ellos. Como se muestra en la figura 10 del complejo de páramos de El Cocuy que se refiere al nivel de profundidad de 0 a 15 cm, ya que este complejo presenta suelos variables, dependiendo de la posición en el terreno, los cuales son superficiales con erosión ligera.



-1

Figura 10. Contenido de carbono orgánico (ton ha⁻¹C) en PPM no intervenida a dos niveles de profundidad (0 a 15 y 15 a 30 cm) de los suelos de los tres complejos de páramo

Fuente: elaboración propia

En referencia al contenido de carbono orgánico (CO) ($\text{ton} \cdot \text{ha}^{-1} \text{C}$), se puede observar que en este escenario de no intervención antrópica (áreas no disturbadas) con relación a la zona en recuperación, se encontraron valores similares, lo anterior se puede atribuir a que los suelos en estos tres complejos son suelos jóvenes, por lo cual el tiempo que han llevado capturando carbono es corto.

Se debe tener en cuenta que “las actividades de manejo tanto para la producción animal como para el aprovechamiento forestal afectan también la captura de carbono” (Pérez et al., 2021) que permite “disminuir la contaminación que se puede dar en la atmósfera y la hidrósfera”, así mismo la concentración de COS está dada por la interacción de la fauna, la profundidad de los suelos, el sistema vegetal, y factores ambientales (Madrigal et al., 2019). Entre las actividades de manejo de producción animal, se tienen la de cría y cuidado para obtener productos como carne y leche, destinados al consumo humano: y en cuanto a las actividades de aprovechamiento forestal se tienen la de extracción, utilización de recursos maderables y no maderables, que afectan la captura de carbono, porque los bosques son sumideros que lo almacenan y si hay erosión en los suelos, tala y deforestación de los árboles, el carbono se libera como dióxido de carbono, generando cambio climático adverso. Por lo que, como indica Solano (2019), “la vegetación de los bosques es relevante al momento de la captura de CO_2 y es fundamental conocer sobre el tema con el objetivo de diseñar y aplicar estrategias de conservación de los árboles de los bosques”.

La biogeoquímica fue abordada mediante el análisis de tres tipos de coberturas vegeta-

les diferentes: intervenida, no intervenida y en recuperación, evaluando procesos pedogenéticos para determinar las concentraciones de COS y así determinar la influencia del material parental y de la actividad antrópica (Castillo, 2019).

El acumulado de carbono orgánico (CO) de los suelos del área no intervenida obtuvo mayores promedios con datos estadísticos diferentes en el páramo de La Rusia para los dos niveles de profundidades definidas (0 a 15 cm y 15 a 30 cm), con 145 ($\text{ton} \cdot \text{ha}^{-1} \text{C}$) y con 110 ($\text{ton} \cdot \text{ha}^{-1} \text{C}$), respectivamente, con respecto a los páramos de El Cocuy e Iguaque como se observa en la figura 11.

Los contenidos de COS para los tres complejos de páramos en PPM no intervenida se muestran en la figura 11, donde se encuentran tres niveles de almacenamiento de carbono orgánico (CO) con los valores definidos en el área investigada. Se observa que los resultados hallados en lo referente al complejo de Guantiva-La Rusia para las dos profundidades son de nivel alto en almacenamiento de carbono orgánico (CO) con 144,93 $\text{ton} \cdot \text{ha}^{-1} \text{C}$ de 0 a 15 cm y 110,03 $\text{ton} \cdot \text{ha}^{-1} \text{C}$ de 15 a 30 cm. Lo anterior se correlaciona con lo expuesto por Cruz-Sánchez et al. (2021), en cuanto a que el contenido de COS baja porque se incrementa el nivel de profundidad de los suelos.

Se presenta un nivel bajo de almacenamiento en el complejo de Iguaque-Merchán con datos de 25,18 $\text{ton} \cdot \text{ha}^{-1} \text{C}$ para la profundidad 0 a 15 cm y de 40,36 $\text{ton} \cdot \text{ha}^{-1} \text{C}$ para la de 15 a 30 cm, mientras que el complejo de El Cocuy en la profundidad de 0 a 15 cm, se obtuvo un valor de 60,44 $\text{ton} \cdot \text{ha}^{-1} \text{C}$ con un nivel medio de almacenamiento de carbono.

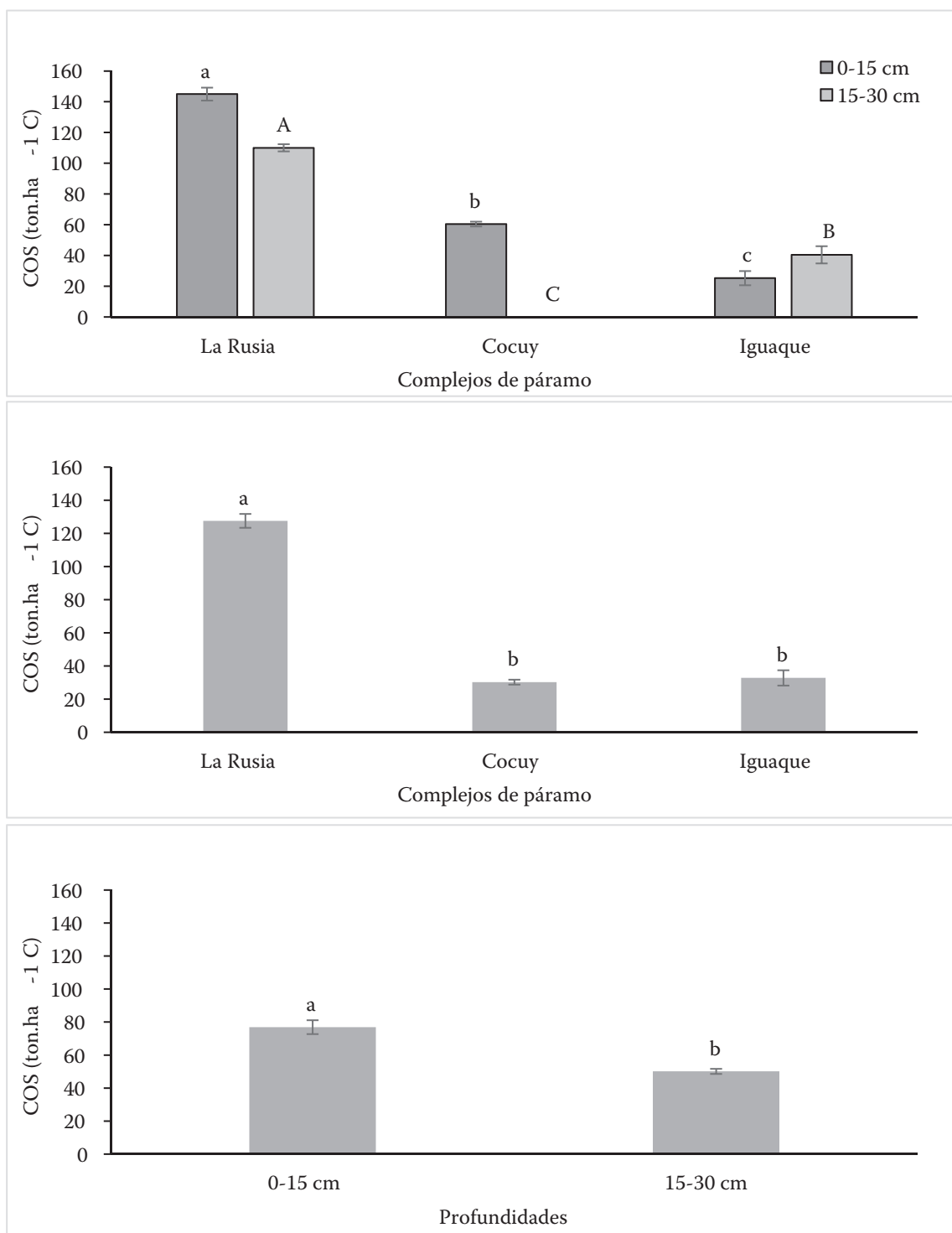


Figura 11. COS ton.ha⁻¹C en PPM no intervenida a dos niveles de profundidad (0 a 15 y 15 a 30 cm) de los suelos de los páramos

Fuente: elaboración propia

“El suelo es un recurso natural imprescindible para disminuir los efectos del cambio climático, por el rol del ciclo de carbono en la tierra” (Burbano, 2018); el carbono orgánico (CO) se encuentra almacenado en los suelos de manglares” (Núñez-Ravelo et al., 2021), “humedales” (Ampuero y Aponte, 2020), “bosques” y “páramo herbáceo” (Gutiérrez et al., 2019) “aunque la mayor concentración de carbono orgánico (CO) en el suelo está en la región de los Andes” (Loayza et al., 2020).

Captura de carbono orgánico según coberturas vegetales

A la profundidad de 0 a 15 cm se hallaron diversas estadísticas importantes en los complejos de páramo y los diferentes tipos de cobertura vegetal, encontrando que la cobertura de pajones del páramo de Iguaque tuvo un mayor promedio de acumulado de carbono orgánico (CO) de 7,79 ton ha⁻¹C, comparada con la cobertura de matorrales en el páramo de La Rusia que presentó el menor promedio de carbono orgánico, de 4,18 ton ha⁻¹C (Figura 12).

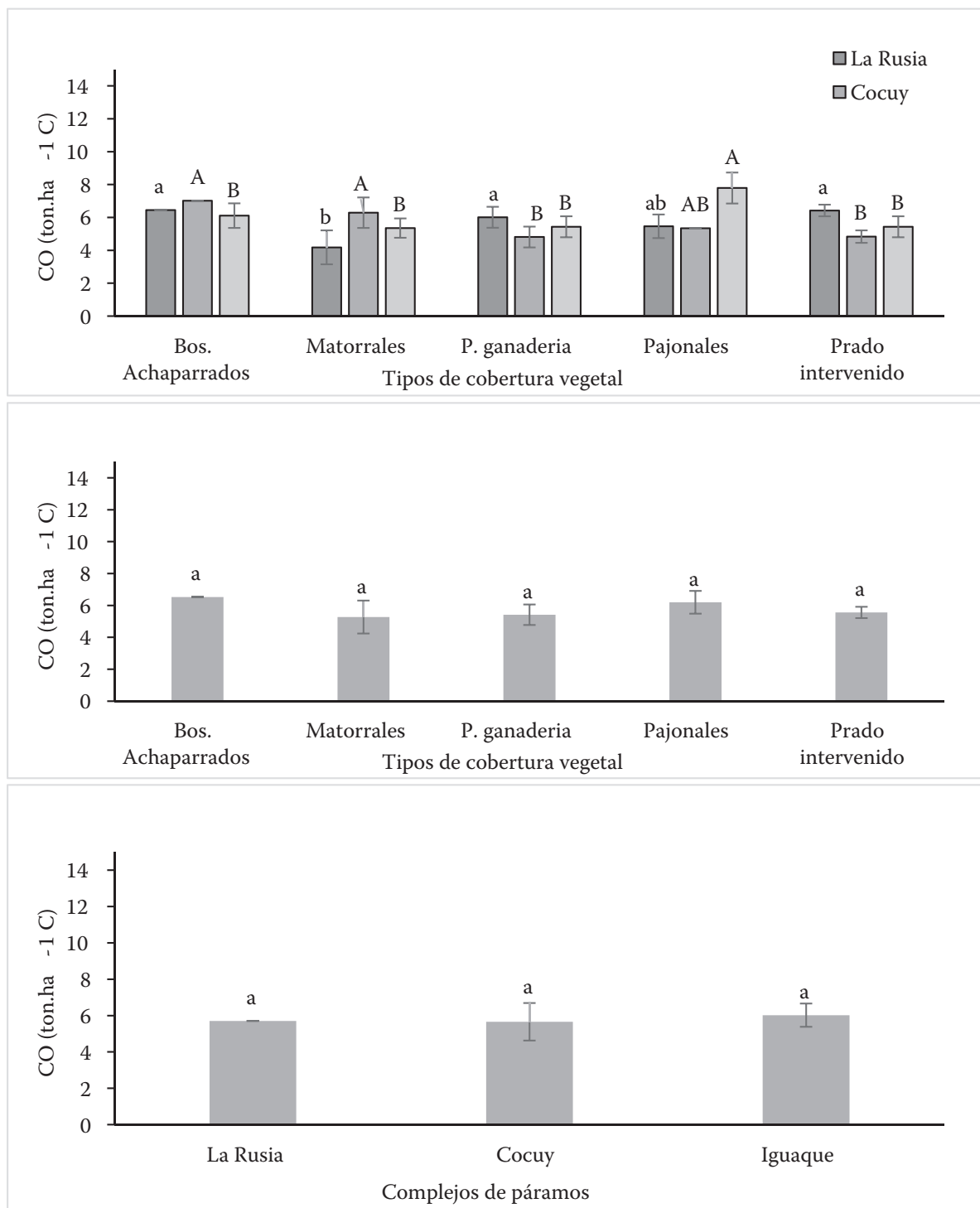
En las figuras 12 y 13 se observan los contenidos de carbono orgánico (CO) referidos

a las coberturas vegetales presentes en los suelos de los sistemas de páramo de Iguaque-Merchán, Guantiva-La Rusia y el complejo de El Cocuy en los niveles de profundidad entre 0 a 15 y 15 a 30 cm. Se puede ver que el mayor contenido de carbono orgánico (CO) para los tres complejos se presenta en los suelos en donde las coberturas vegetales son los pajonales y bosques achaparrados con valores entre 5,93 y 9,39 ton ha⁻¹C. A un nivel de profundidad de 15 a 30 cm, se observaron diversas estadísticas importantes entre la cobertura de matorrales en el páramo de El Cocuy, con respecto a prados para ganadería que tuvieron el menor promedio de carbono orgánico para este mismo páramo con un valor de 4,04 ton ha⁻¹C (Figura 13).

En las zonas donde predominan los pastos para ganado y prado intervenido con valores de 3,70 y 4,05 ton ha⁻¹C, respectivamente, se encontraron los menores contenidos de carbono orgánico (CO), lo que concuerda con lo mencionado por Bolívar et al. (2021) “disminuye la captura de de COS y por ende se da un incremento de dióxido de carbono hacia el medio ambiente. Es decir que el suelo compensa de manera significativa las emisiones de CO₂” (Universidad Nacional de Colombia, 2022).

CAPTURA DE CARBONO EN SUELOS BAJO TRES COBERTURAS VEGETALES EN COMPLEJOS DE PÁRAMOS DE BOYACÁ

Vásquez, J. A., Cely, G. E. y Serrano, P. A.



-1

Figura 12. Contenido de carbono orgánico (ton ha⁻¹C) en el suelo (0 a 15 cm), respecto a las coberturas vegetales presentes en los sistemas de páramo de Iguaque-Merchán, Guantiva-La Rusia y El Cocuy

Fuente: elaboración propia

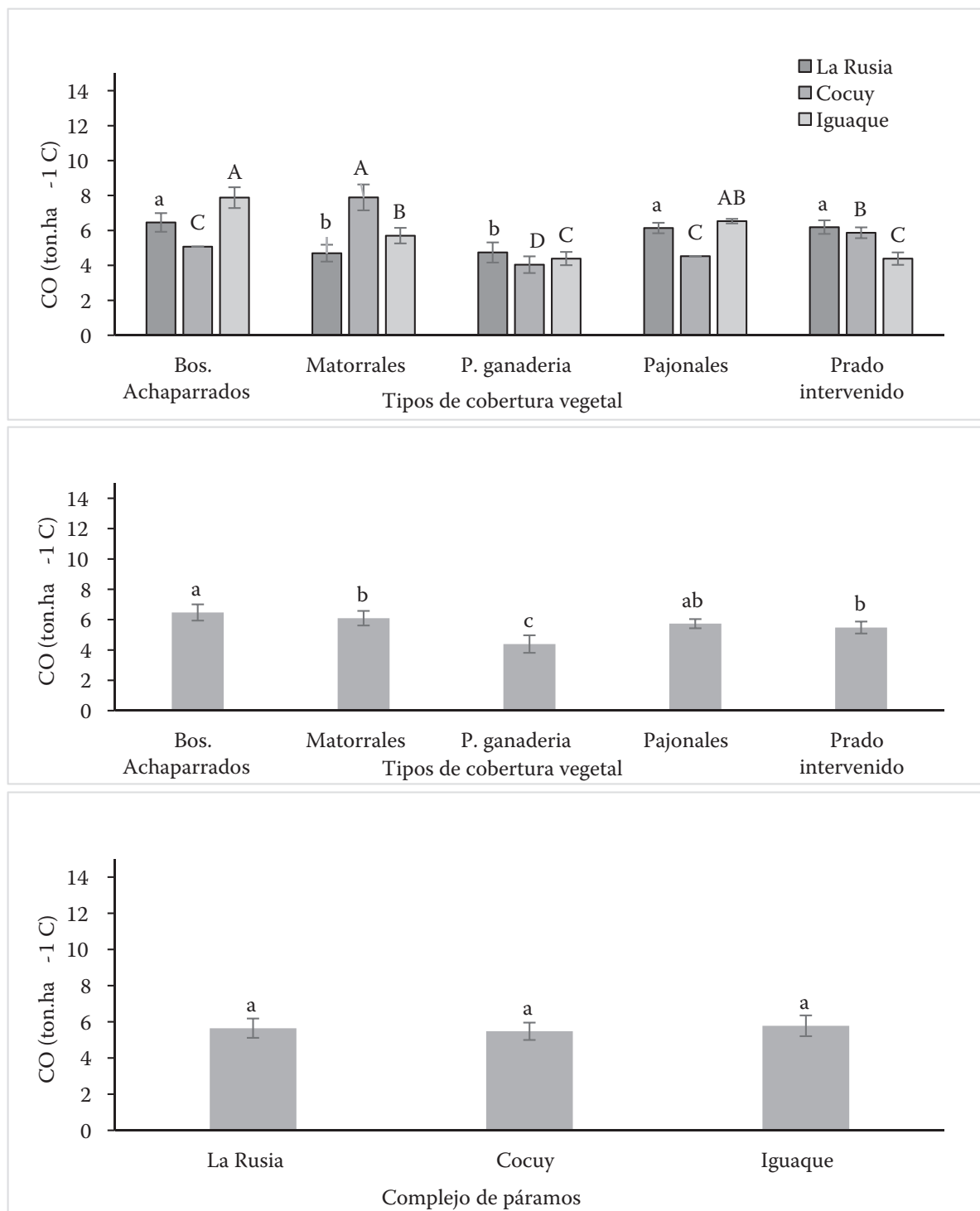


Figura 13. Contenido de carbono orgánico (ton ha⁻¹C) en el suelo (15 a 30 cm), respecto a las coberturas vegetales presentes en los sistemas de páramo de Iguaque-Merchán, Guantiva La Rusia y El Cocuy.

Fuente: elaboración propia

Carbono orgánico equivalente (COe)

La captura de carbono “en el suelo es el proceso mediante el cual el carbono se transfiere de la atmósfera a los suelos. El almacenamiento de carbono en el suelo es la retención del carbono secuestrado en el suelo” (Pérez y Rodríguez, 2019). La capacidad de captura de carbono tiene cuatro niveles, los cuales se clasifican de la siguiente manera: Bajo < 182,5 ton.ha⁻¹C, Medio (182,5-365 ton.ha⁻¹C), Alto (365-547,5 ton.ha⁻¹C) y Muy Alto > 547,5 ton.ha⁻¹C.

El carbono orgánico equivalente de los suelos obtuvo diversas estadísticas importantes entre los sistemas de páramos a los dos niveles de profundidad, observando que el páramo de La Rusia tiene un mayor contenido promedio a una profundidad de 0 a 15 cm, comparado con el páramo de El Cocuy, mientras que el páramo de Iguaque obtuvo el mayor promedio a una profundidad de 15 a 30 cm (Figura 14).

En la figura 14 se muestra que la capacidad de captura de carbono en cuanto a PPM intervenida fue más alta en los sistemas de

Guantiva-La Rusia en la profundidad de 0-15 cm con un valor de 348,76 ton.ha⁻¹C (nivel medio), mientras que para la profundidad de 15 a 30 cm el valor más alto de los tres complejos lo presentó Iguaque-Merchán, con 292,66 ton.ha⁻¹C (nivel medio), lo cual reafirma lo que dicen Bolívar et al. (2021) en Colombia: “los mayores contenidos de carbono se asocian a los suelos relacionados con las cadenas de montañas de las cordilleras”. De acuerdo con lo anterior, Acosta et al., (2021) indican que los suelos se modifican en sumideros del carbono, ya que mediante la actividad de la fotosíntesis logra la transformación de CO₂ en biomasa viva. El complejo de El Cocuy presentó para las dos profundidades (0-15 y 15-30 cm) los valores en el nivel bajo, con 119,27 y 33,30 ton.ha⁻¹C, respectivamente.

Hubo diferencias estadísticas para carbono orgánico (CO) equivalente de los suelos al nivel de profundidad de 15 a 30 cm, en los tres complejos de páramo, en donde el más alto es del páramo de La Rusia con 872 ton.ha⁻¹C; mientras que para la profundidad de 0 a 15 cm hubo estadísticas similares en los tres complejos de páramo (Figura 15).

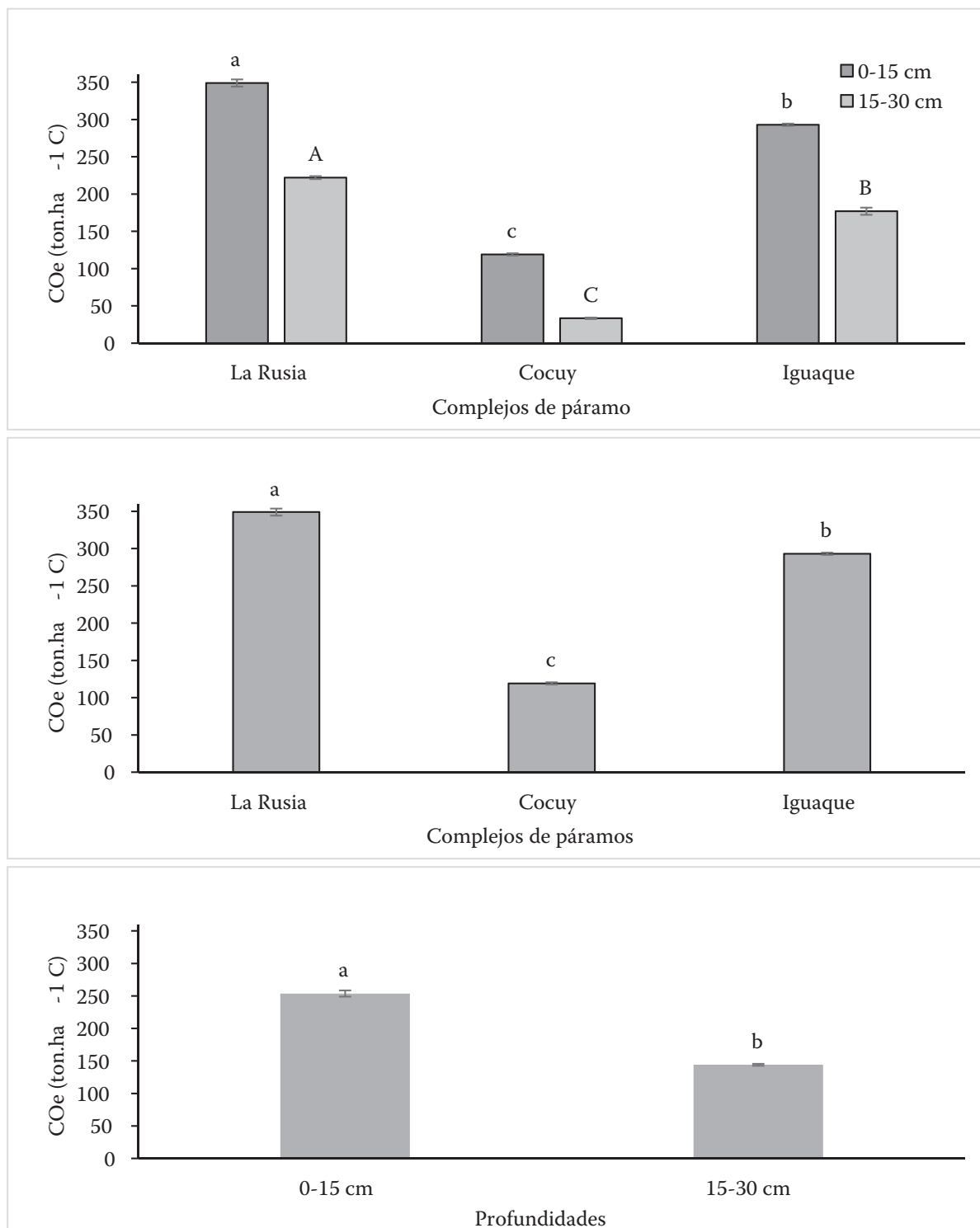


Figura 14. Carbono orgánico equivalente en PPM intervenida a dos niveles de profundidad (0 a 15 y 15 a 30 cm) de los suelos de los tres complejos de páramo

Fuente: elaboración propia

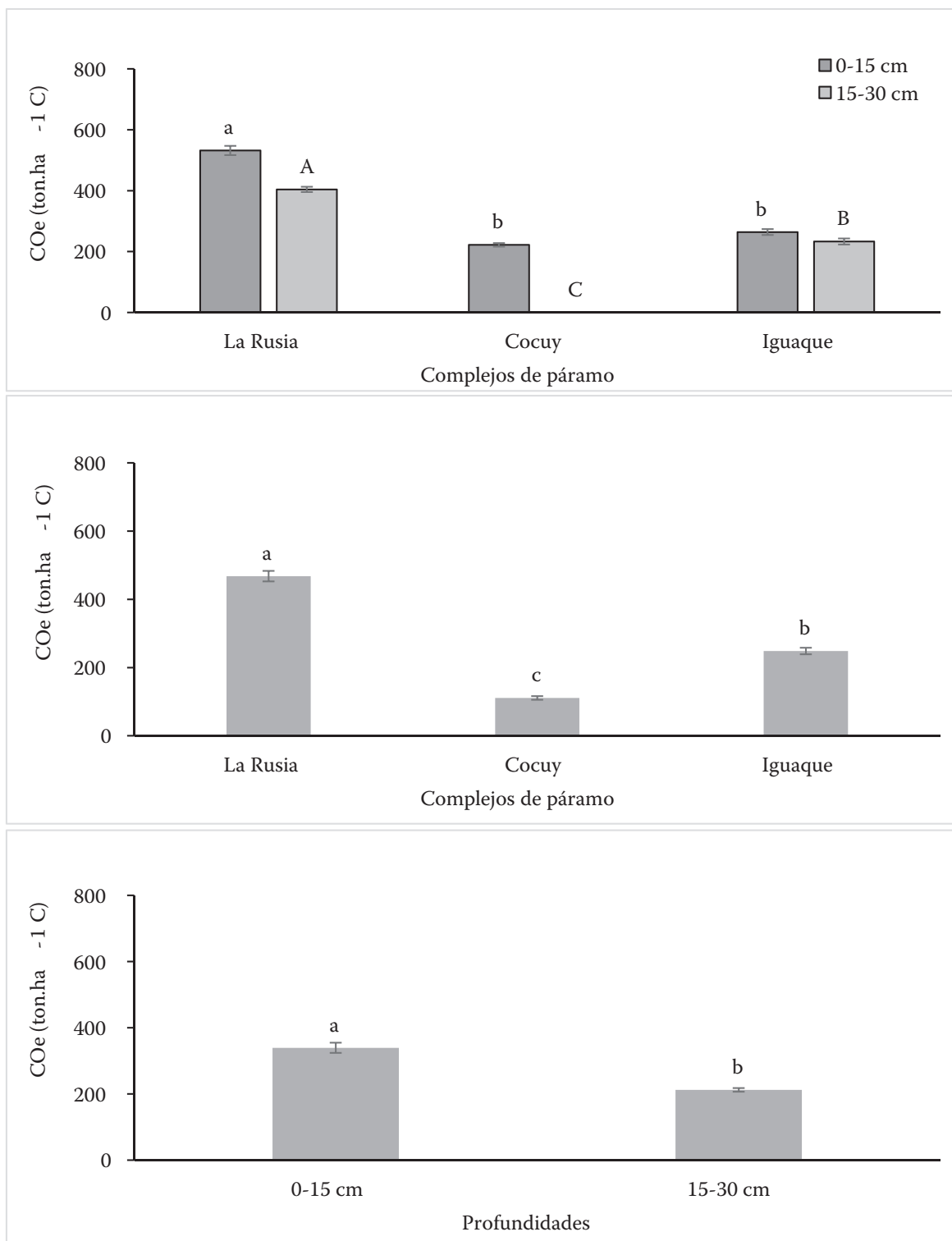


Figura 15. Carbono orgánico equivalente en PPM en recuperación a dos niveles de profundidad (0 a 15 y 15 a 30 cm) de los suelos de los tres complejos de páramo

Fuente: elaboración propia

Como muestra la figura 15 en los tres complejos evaluados ubicados en Boyacá, la mayor capacidad de captura en PPM se presentó en la profundidad de 15 a 30 cm. En los complejos de Guantiva-La Rusia y El Cocuy se presentó el nivel muy alto de captura de carbono con los valores respectivos de 872,26 y 696,93 $\text{ton.ha}^{-1}\text{C}$, y el más bajo fue el del complejo de Iguaque-Merchán, con 447 $\text{ton.ha}^{-1}\text{C}$, que tiene varias áreas que han sido intervenidas de manera antrópica, lo cual afecta el almacenamiento del carbono orgánico (CO), tal como lo referencian Romero et al. (2023), quienes indican que “el cambio de uso del suelo ha contribuido en al menos 35% de las emisiones antropogénicas de CO_2 , lo cual se vincula a la pérdida de biomasa y de carbono por encima y por debajo del suelo”. En cuanto a la profundidad de 0 a 15 cm se muestran valores similares para los tres complejos, de la siguiente manera: Iguaque-Merchán (260,58 $\text{ton.ha}^{-1}\text{C}$), Guantiva-La Rusia (252,24) y El Cocuy (286,61 $\text{ton.ha}^{-1}\text{C}$), pertenecientes a nivel medio de capacidad de captura, en la cual, como dicen, Carvajal-Agudelo y Andrade (2020) “la asimilación de carbono lleva a la contribución básica en la mitigación del fenómeno conocido como cambio climático”.

También se observó que el complejo de páramo La Rusia tuvo los valores promedios más altos con diferencias estadísticas significativas con relación a los demás páramos del estudio, para las dos profundidades (0 a

15 cm y 15 a 30 cm), las cuales fueron (532 y 404 $\text{ton.ha}^{-1}\text{C}$, respectivamente), seguidos del páramo de Iguaque y, finalmente, el páramo de El Cocuy que reportó los valores promedio más bajos (Figura 16).

La figura 16 deja observar que en las PPM no intervenidas (áreas conservadas), en cuanto a los que tienen la capacidad mayor de captura de carbono orgánico (CO) la tiene el complejo de Guantiva-La Rusia, con valores de 531,89 y 403,79 $\text{ton.ha}^{-1}\text{C}$ para los niveles de profundidad entre 0 a 15 y 15 a 30 cm, perteneciendo así a nivel alto de capacidad de captura. El complejo de El Cocuy presentó un valor con nivel medio en la profundidad 0 a 15 cm, con 221,82 $\text{ton.ha}^{-1}\text{C}$, mientras que para 15 a 30 cm no se obtuvo análisis al hacerse imposible el muestreo para esta profundidad por la presencia del material parental como se señaló anteriormente. El nivel de capacidad de captura muy bajo tuvo lugar en el complejo de Iguaque-Merchán para las dos profundidades, como se indica en la figura 15, donde los valores obtenidos fueron de 92,40 $\text{ton.ha}^{-1}\text{C}$ (0-15 cm) y 148,12 (15-30 cm). Por lo tanto, y como indican Cely et al. (2019) “la cobertura vegetal del páramo se convierte en un escenario de mitigación del efecto del cambio climático, básicamente, por la captura y almacenamiento de carbono edáfico”, lo cual es prioritario para mejorar la calidad de vida de la población.

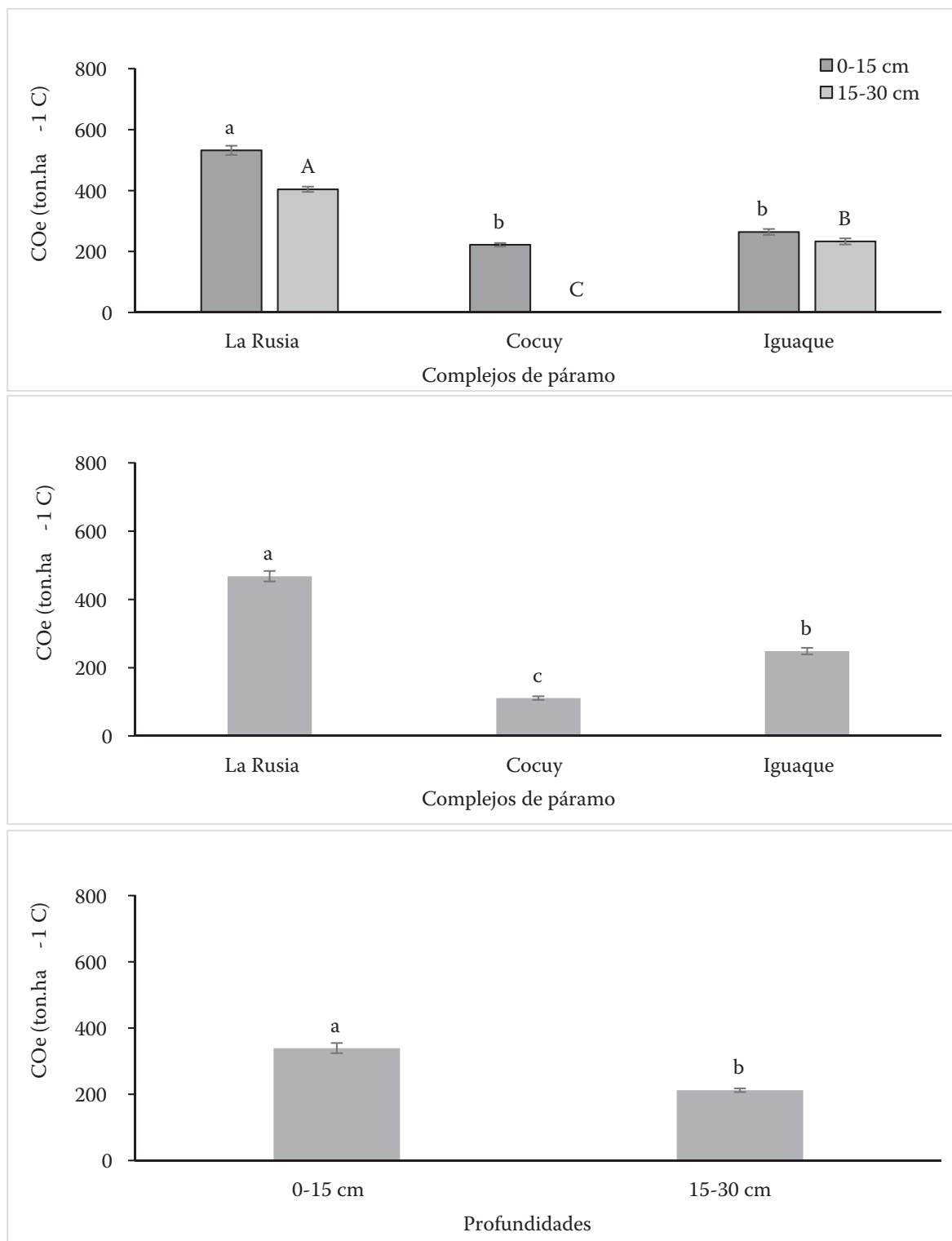


Figura 16. Carbono orgánico equivalente en PPM no intervenida a dos niveles de profundidad (0 a 15 y 15 a 30 cm) de los suelos de los tres complejos de páramo

Fuente: elaboración propia

Por eso, la importancia de avanzar en investigaciones sobre el tema de captura de carbono, porque a pesar de que se han realizado varias y, tal como lo señalan Andrade et al., (2022), los estudios relacionados con el COS en sistemas naturales de páramo son insuficientes y aunque se centran en los cambios en el contenido de carbono debido a la utilización del suelo, solo se destacan en las disimilitudes en el contenido de COS a 4 m de profundidad entre bosques de la distintas formas (Lis-Gutiérrez et al., 2019); esto hace que la información sea limitada para hacer

comparaciones en ecosistemas de similares condiciones. Otro aspecto que limita las investigaciones es el tamaño de la muestra que es de gran influencia, puesto que, por costos, es difícil cubrir una zona más amplia en donde se pueda obtener mayor cantidad de información sobre cada uno de los factores que intervienen en la captura de carbono en el suelo, que resulta ser un tema vital para seguir investigando, con el fin de lograr implementar acciones que busquen la protección de la biodiversidad y del medio ambiente.

4 CONCLUSIONES

Los suelos de páramo son un componente clave en el desarrollo del ciclo del carbono, igualmente se convierten en una fuente o reservorio de carbono hacia el entorno, pero depende de cómo son usados por las personas que se establecen en ellos. Las actividades agrícolas convencionales promueven la liberación de CO_2 hacia la atmósfera provocando así el calentamiento global, mientras que el uso conservacionista y la protección de los ecosistemas nativos favorecen el incremento del carbono en diversas materias orgánicas en los suelos; lo anterior, porque las prácticas agrícolas como el arado, el sobrepastoreo o la quema, incrementan la liberación de carbono y las prácticas conservacionistas como la reforestación o el manejo pasivo de la vegetación y permiten la retención de carbono que se acumula en la materia orgánica bajo condiciones de bajas temperaturas y poca perturbación, como ocurre en los páramos.

Un alto contenido de carbono permite favorecer a largo plazo en la atenuación o disminución de los factores que impulsan el cambio climático. Por lo anterior es importante llevar a cabo investigaciones sobre la captura y emisión de carbono en ecosistemas, tanto nativos como intervenidos de manera antrópica, en donde se presenten procesos de alteración de la utilización de los suelos, mostrando diferencias en la acumulación del carbono orgánico (CO) y así se puedan establecer diferentes opciones de mitigación de GEI, como la promoción de incentivos para buenas prácticas agrícolas, políticas públicas de restauración o el establecimiento de sistemas de monitoreo del carbono en suelos de alta montaña, lo cual busca poder mejorar la capacidad de los suelos para la captura del carbono orgánico.

Los resultados de las mediciones en la investigación determinan las acumulaciones de carbono en los suelos de los diferentes es-

cenarios evaluados en estos tres complejos de páramos del departamento de Boyacá, en los cuales se observa que las áreas estudiadas de forma antrópica y los lugares de recuperación refieren un alto contenido de captura de carbono, mostrándose como sumide-

ros potenciales, por lo cual es manifiesta la importancia para estas zonas de establecer programas enfocados a la mitigación y la liberación de CO₂ hacia la biodiversidad de alta montaña, remplazando las actividades agrícolas por prácticas conservacionistas.

CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA

Primer autor: Investigador del proyecto, desarrollo metodológico, estudio de datos, descriptor de conceptos, escritor, edición e investigación original.

Segundo autor: Supervisor del proyecto, descriptor de conceptos, análisis de información y revisión.

Tercer autor: Director de grupo de investigación, logística y revisión.

AGRADECIMIENTOS

A la Corporación Autónoma Regional de Boyacá “Corpoboyacá”, por la generación de los recursos para el proyecto de investigación “Determinación del efecto del cambio climático en áreas vulnerables de ecosistemas de alta montaña, en los complejos de páramo de Guantiva-La Rusia, Iguaque-Merchán y El Cocuy” en el Convenio Interadministrativo N.º CNV 2014-008, celebrado entre Corpoboyacá y la Universi-

dad Pedagógica y Tecnológica de Colombia UPTC sede Tunja. Al laboratorio de Suelos y Aguas de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia UPTC, por los métodos analíticos realizados en dicho laboratorio. Al Grupo de Investigación en Desarrollo y Producción Agraria Sostenible – GIPSO de la UPTC sede Tunja, por el apoyo logístico en la realización del presente artículo.

USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

N^o aplica.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

LITERATURA CITADA

- Aburto, J. A. (2022). *Determinación de carbono orgánico total en suelos forestales y agrícolas* de la CDMX. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco. <https://repositorio.xoc.uam.mx/jspui/handle/123456789/41018>
- Acosta, M. M., Carrillo, F., Buendía, E., Benavides, J., Flores, E. y González, L. (2021). Carbono en suelo, hierbas y arbustos en una plantación forestal en Jalisco, México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 11(6), 1377-1387. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i6.2427>
- Ampuero, W. y Aponte, H. (2020). Estimación del carbono almacenado en un junjal de *Schoenoplectus americanus* en el humedal costero Los Pantanos de Villa (Lima - Perú). *Arnaldoa*, 27(1), 267-282. <https://doi.org/10.22497/1505>
- Andrade C. H., Patiño, F. S., Suárez, S. L. N y Segura, M. M. (2018). Captura de carbono en biomasa en plantaciones forestales y sistemas agroforestales en Armero-Guayabal, Tolima, Colombia. *Revista de Investigación Agraria Y Ambiental*, 9(2), 121-134. <https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/article/view/2312/2838>
- Andrade, H. J., Segura, M. A., y Canal-Daza, D. S. (2022). Conservation of Soil Organic Carbon in the National Park *Santuario de Fauna y Flora Iguaque*, Boyacá-Colombia. *Forests*, 13(8), 1275. <https://doi.org/10.3390/f13081275>
- Bolívar, A., Camacho, C., Ordóñez, N., Gutiérrez, J., Álvarez, G., Guevara, M., Olivera, C., Olmedo, G., Bunning, S. y Vargas, R. (2021). Estimación de carbono orgánico del suelo en Colombia, una herramienta de gestión del territorio. Colombia. *Ecosistemas* 30(1):2019. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2019>
- Bongiorno, G., Bünemann, E. K., Oguejiofor, C. U., Meier, J., Gort, G., Comans, R., Mader, P., Brussaard, L. & De Goe-de, R. (2019). Sensitivity of labile carbon fractions to tillage and organic matter management and their potential as comprehensive soil quality indicators across pedoclimatic conditions in Europe. *Ecological Indicators*, 99, 38-50. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.12.008>
- Burbano Orjuela, H. (2018). The soil organic carbon and its role on climate change. *Revista De Ciencias Agrícolas*, 35(1), 82-96. <https://doi.org/10.22267/rcia.183501.85>
- Carvajal-Agudelo, B. N. y Andrade, H. J. (2020). Captura de carbono en biomasa de sistemas de uso del suelo, municipio de Yopal, Casanare, Colombia.

- Orinoquia*, 24(1), 13-22. <https://doi.org/10.22579/20112629.587>
- Castillo Lagos, P. (2019). *Biogeoquímica del sistema roca-suelo-plantas en cuatro viñas de Chile Central (33°-36°S): influencias litogénicas, pedogenéticas y antrópicas*. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/174184>
- Cely, R. G., Fernández, P. C y 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., Universidad Nacional de Colombia.
- Corporación Autónoma Regional de Boyacá – Corpoboyacá (2025a). Páramo de Guantiva-La Rusia. Colombia. <https://www.corpoboyaca.gov.co/sirap/paramo-guativa-la-rusia/>
- Corporación Autónoma Regional de Boyacá – Corpoboyacá (2025b). Páramo Iguaque – Merchán. Colombia. <https://www.corpoboyaca.gov.co/sirap/paramo-iguaque-merchan/>
- Cruz-Sánchez, Y., López-Teloxa, L. C., Gómez-Díaz, J. D. y Monterroso-Rivas, A. I. (2021). Respiración del suelo en un bosque templado de México y su relación con el carbono orgánico. *Madera y Bosques*, 27(2). <https://myb.ojs.inecol.mx/index.php/myb/article/view/2153>
- Cuervo Barahona, E. (2019). Potencial de liberación y fracciones de carbono orgánico en el suelo del Páramo la Cortadera. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Disponible en: <http://repositorio.uptc.edu.co/handle/001/3474>
- Eichhorn, C. P., Guzmán, G. A. y Hurtado, J. V. (2018). *Diseño metodológico para la estimación de captura de carbono en áreas ideales de restauración ecológica a partir de imágenes satelitales. Caso de estudio: municipio de Pesca, Boyacá, Colombia*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. <https://repository.udistrital.edu.co/items/f2e4b0d5-1898-4837-b267-7d2205bdcfde>
- Eze, S., Palmer, S. M. & Chapman, P. J. (2018a). Soil organic carbon stock and fractional distribution in upland grasslands. *Geoderma*. 314, 175-183. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.017>
- Eze, S., Palmer, S. M., Chapman, P. J. (2018b). Soil organic carbon stock in grasslands: Effects of inorganic fertilizers, liming and grazing in different climate settings. *Journal of Environmental Management*. 223:74-84. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.06.013>
- Fernández, C. J., Cely, G. E. y Ramírez, 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://revistas.unal.edu.co/index.php/rcg/article/view/66152>
- Flóres y Calderón. (2021). *La relación de carbono orgánico a nitrógeno total en sue-*

- los agrícolas*. México. Laboratorio A-L de México S.A.
- Fonseca-Vargas, R., Furcal-Beriguete P., Campos-Rodríguez, R. y Esquivel-Segura, E. (2019). Retención de carbono en un suelo dedicado al cultivo de piña (*Ananas comosus* L.) bajo un manejo convencional y de mínima labranza. *Tecnología en Marcha*. 32(4), 116-132. DOI:10.18845/tm.v32i4.4797
- Gómez-Balanta, F.Z. y Ramírez-Nader, L. M. (2022). Contenidos de carbono y nitrógeno del suelo en un agroecosistema altoandino del Valle del Cauca, Colombia. *Revista UDCA. Actualidad & Divulgación Científica*. 25(2). <https://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.2057>
- Gutiérrez, J., Ordóñez, N., Bolívar, A., Bunning, S., Guevara, M., Medina, E., Olivera, C., Olmedo, G., Rodríguez, L., Sevilla, V. y Vargas, R. (2019). Estimación del carbono orgánico en los suelos de ecosistema. *Revista Científica de Ecología y Medio Ambiente*, 29(1), 1855. <https://doi.org/10.7818/ECOS.1855>
- Izquierdo, J. y Arévalo, J. (2021). Determinación del carbono orgánico por el método químico y por calcinación. Colombia. *Revista Ingeniería y Región*, 26. https://www.researchgate.net/publication/358655904_Determinacion_del_carbono_organico_por_el_metodo_quimico_y_por_calcinacion
- Lis-Gutiérrez, M., Rubiano, Y. y Loaiza, J. C. (2019). Suelos y uso del suelo en el estudio del carbono orgánico del suelo en la catena del altiplano colombiano. Colombia. *AUC Geograph* 54 (1), 15-23. https://www.researchgate.net/publication/333093757_Soils_and_land_use_in_the_study_of_soil_organic_carbon_in_Colombian_highlands_catena
- Loayza, N. 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. Revista Científica de Ecología y Medio Ambiente*, 29(2), 1852. <https://doi.org/10.7818/ECOS.1852>
- Lorenz, K., & Lal, R. (2016). *Soil organic carbon – An appropriate indicator to monitor trends of land and soil degradation within the SDG framework?* Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1968/publikationen/2016-11-30_soil_organic_carbon_as_indicator_final.pdf
- Luna, E. O., Cantú, I., Hernández, F. J. y Bejar, S. J. (2023). Efectos del manejo forestal en la emisión de CO₂ de un suelo umbrisol en bosques de Durango, México. <https://doi.org/10.18387/polibotanica.56.6>
- Madrigal S., Cristóbal, D., Hernández, E. y Romo, J. E. (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>
- Malek, Ž., Douw, B., Van Vliet, J., Van Der Zanden, E. H. & Verburg, P. H. (2019). Local land-use decision-making in a global context. *Environmental Research Letters*, 14(8), 083006. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ab309e>

- Mondragón, V. A., Moreno, F. y Jaramillo, D. F. (2022). Impacto del uso de suelo sobre el secuestro del carbono orgánico en un área natural de Medellín, Colombia. *Acta Agronómica*, 71(1), 39-46. <https://doi.org/10.15446/acag.v71n1.101342>.
- Núñez-Ravelo, F., Ugas-Pérez, M., Calderón-Castellanos, R. y Rivas-Meriño, F. (2021). Cuantificación del carbono orgánico y materia orgánica en suelos no rizosféricos o cubiertos por *Avicennia germinans* (L.) y *Conocarpus erectus* (L.) emplazados en Boca de Uchire, laguna de Unare, Estado de Anzoátegui, Venezuela. *Revista Geográfica de América Central*, 66(1), 371-398. <https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/geografica/article/view/13667>
- Oliveira, J. G., Da Silva, R. V. y De Oliveira, A. L. (2022). Equivalent carbon dioxide balance in coffee crops. *Research, Society and Development*, [S. l.], v. 11, n. 7, p. e25311729966, 2022. <https://rsdjournal.org/rsd/article/view/29966>.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2017). *Carbono orgánico del suelo, el potencial oculto*.
- Ortiz, P. A. (2022). *Cubiertas vegetales de especies nativas en el olivar*. Universidad de Jaén. <https://hdl.handle.net/10953.1/21430>
- Pardo-Plaza, Y. J., Paolini, J. E. y Cantero-Guevara M. E. (2019). Biomasa microbiana y respiración basal del suelo bajo sistemas agroforestales con cultivos de café. *Revista U.D.C.A. Actualidad & Divulgación Científica*, 22(1). <https://doi.org/10.31910/rudca.v22.n1.2019.1144>
- Parques Nacionales Naturales de Colombia. (2025). *Parque Nacional de Cocuy*. Colombia. <https://old.parquesnacionales.gov.co/portal/es/ecoturismo/parques/region-andina/parque-nacional-natural-el-cocuy-3/>
- Parques Nacionales Naturales de Colombia. (2025). *Parque Nacional de Iguaque*. Colombia. <https://www.parquesnacionales.gov.co/sala-prensa/noticias/el-santuario-de-fauna-y-flora-iguaque-abre-nuevamente-sus-puertas-al-ecoturismo/>
- Pérez, H. I. y Rodríguez, D. I. (2019). Secuestro de carbono por el suelo en agroecosistemas tropicales muy secos de la provincia El Oro, Ecuador. *Revista Científica Agroecosistemas*, 7(2), 125-131. <https://aes.ucf.edu/cu/index.php/aes>
- Pérez, I. H., Rodríguez, D. I. y García, B. R. (2021). Secuestro del carbono, por el suelo y sus fracciones en agroecosistemas tropicales de la región costa ecuatoriana. *Revista Universidad y Sociedad*, 13(2), 141-149. ISSN 2218-3620.
- Pinos-Morocho, D., Morales-Matute, O. y Durán-López M. E. (2021). Suelos de páramo: Análisis de percepciones de los servicios ecosistémicos y valoración económica del contenido de carbono en la sierra sureste del Ecuador. *Revista de Ciencias Ambientales*, 55(2), 157-179. <https://doi.org/10.15359/rca.55-2.8>
- Pinilla, M. A. y Pareja, J. P. (2023). *Prospectiva sectorial de los servicios ambientales*

- para el secuestro de carbono en Colombia* 2035. Universidad Externado de Colombia. <https://doi.org/10.57998/bdigital/handle.001.459>
- Ramírez, R., Leiva, E. I. y Restrepo, R. F. (2023). Materia orgánica particulada y mineralogía de un Andisol bajo labranza y barbecho. *Acta Agronómica*, 70(4), <https://doi.org/10.15446/acag.v70n4.80861>
- Ramos, E. G., Ley, E., Arce, C., Escobar, J., Aryal, D., Pinto, R., Guevara, F. y Guerra, M. (2018). Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.) en el trópico húmedo de Chiapas, México. *Agrociencia*, 52(5). https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952018000500671
- Romero, J., Aguilar-Ávila, J., Santoyo, V. H. y Diakite, L. (2023). Transiciones del cambio de uso de suelo en el estado de Puebla (1980-2016). *Investigaciones Geográficas*, 109. <https://doi.org/10.14350/rig.60621>
- Ruiz, B. A., Hernández, E., Salcedo, E., Rodríguez, R., Gallegos, A., Valdés, E. y Sánchez, R. (2019). Almacenamiento de carbono y caracterización lignocelulósica de plantaciones comerciales de *Tectonagrandis* L.f. en México. *Colombia Forestal*, 22(2), 15-29. <https://doi.org/10.14483/2256201X.13874>
- Rumpel, C., Amiraslani, F., Chenu, C., García Cárdenas, M., Kaonga, M., Koutika, L. S. y Wollenberg, E. (2020). La iniciativa 4p1000: Oportunidades, limitaciones y desafíos para implementar el secuestro de carbono orgánico del suelo como estrategia de desarrollo sostenible. *Ambio*, 49(1), 350-360. <https://doi.org/10.1007/s13280-019-01165-2>
- Secretaría de la Alianza Mundial por el Suelo (AMS) & Grupo Técnico Intergubernamental sobre Suelos (GTIS). (2016). *GSP Guidelines for sharing national data/information to compile a Global Soil Organic Carbon (GSOC) map*. FAO. <https://openknowledge.fao.org/bitstreams/0e9e-6885-076e-4ff1-92fb-787449f11094/download>
- Solano, D. J. (2019). *Variación en la captura de carbono en Ceiba pentandra y Albizia saman según el grado de intervención, municipio Santiago de Cali (Colombia)*. Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/items/0cc2c365-b2ef-4abf-8712-c3a1c5f95c1d>
- Somoza, A., & Vazquez, P. S. (2022). Spatio-temporal variation of the organic carbon stock and its relationship with changes in land use. Tandil department, Austral Pampean Region, Argentina. *Revista Geográfica De América Central*, 1(70), 477-541. <https://doi.org/10.15359/rgac.70-1.18>
- Tfaily, M. M., Chu, R. K., Toyoda, J., Tolić, N., Robinson, E. W., Paša-Tolić, L., & Hess, N. J. (2017). Sequential extraction protocol for organic matter from soils and sediments using high resolution mass spectrometry. *Analytica Chimica Acta*, 972, 54-61. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2017.03.031>
- Toledo, A. T. y Lazo, R. S. (2021). Captura de carbono en la especie *Tillandsia erder-*

- mannii Y *Tillandsia purpurea* en las lomas arrojadero situada entre los distritos de Inclán y Locumba, Tacna. *Ingeniería Investiga*, 3(2). <https://doi.org/10.47796/ing.v3i2.537>
- Universidad Nacional de Colombia. (2022). *Proyecto 1001 caracterización del suelo y formulación de alternativas para la restauración de coberturas y uso sostenible*. <https://ecopedia.cvc.gov.co/sites/default/files/archivosAdjuntos/1.%20Informe%20Final%20Actividad%20008%20-%20Pr%C3%A1cticas%20-%20Vigencia%202021.pdf>
- Vargas, C. A., González, J. M. y Rueda, M. A. (2022). Evaluación ambiental en el escenario actual y con bonos de carbono: páramo La Cortadera, departamento de Boyacá, Colombia. *Perspectiva Geográfica*, 27(1), 125-145. <https://doi.org/10.19053/01233769.11953>
- Vargas-Larreta, B., Amezcua, M., López-Martínez, J. O., Cueto-Wong, A., Cruz-Cobos, F., Nájera-Luna, J. A. y Aguirre-Calderón, C. G. (2023). Estimación de los almacenes de carbono orgánico en el suelo en tres tipos de bosque templado en Durango, México. *Bot. Sci.*, 101(1). <https://doi.org/10.17129/botsci.3094>
- Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1), 29–38. <https://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>
- Walteros-Torres, I., Palacios-Pacheco, S., Cely, G. E., Serrano, P. A. y 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). *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 25(2). <https://doi.org/10.31910/ru-dca.v25.n2.2022.1846>
- Winter S, Bauer T, Strauss P, et al. Effects of vegetation management intensity on biodiversity and ecosystem services in vineyards: A meta-analysis. *J Appl Ecol*. 2018; 55: 2484–2495. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13124>
- Zamora-Morales, B. P., Mendoza-Cariño, M., Sangerman-Jarquín, D. M., Quevedo, A. y Navarro, A. (2020). El manejo del suelo en la conservación de carbono orgánico. *Rev. Mex. Cienc. Agríc*, 9(8). <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i8.1723>

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.



Licencia de Creative Commons

Revista de Investigación Agraria y Ambiental is licensed under a Creative Commons Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual 4.0 Internacional License.

