

Contenidos de carbono y nitrógeno del suelo en un agroecosistema altoandino del Valle del Cauca, Colombia

Carbon and nitrogen content of the soil in a high Andean agroecosystem of Valle del Cauca, Colombia

Francy Zorayda Gómez-Balanta^{1*} ; Luis Miguel Ramírez-Náder¹ 

¹Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira. Palmira - Valle del Cauca, Colombia; e-mail: fragomez@unal.edu.co; lramirez@unal.edu.co

*autor de correspondencia: fragomez@unal.edu.co

Cómo citar: Gómez-Balanta, F.Z.; Ramírez-Náder, L.M. 2022. Contenidos de carbono y nitrógeno del suelo en un agroecosistema altoandino del Valle del Cauca, Colombia Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 25(2):e2057. <http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.2057>

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: octubre 8 de 2021

Aceptado: noviembre 8 de 2022

Editado por: Helber Adrián Arévalo Maldonado

RESUMEN

Los ecosistemas altoandinos o de alta-montaña, se caracterizan por prestar servicios ecosistémicos esenciales, muchos de ellos, relacionados con el suelo; sin embargo, se conoce que las actividades agrícolas y pecuarias han llevado a cambios progresivos en los parámetros físicos, químicos y agotamiento del carbono orgánico y nitrógeno del suelo, contribuyendo a la pérdida de calidad edáfica e incrementando las emisiones de gases de efecto invernadero. Este estudio evaluó la influencia de tres coberturas vegetales: bosque nativo, pastizal naturalizado de *Pennisetum clandestinum* y monocultivo de *Allium fistulosum*, sobre algunas propiedades del suelo, en un ecosistema altoandino del Valle del Cauca (Colombia). Se midieron propiedades edáficas, como densidad aparente, materia orgánica, contenidos y almacenamiento de C y N. Se encontró que las prácticas agrícolas asociadas al monocultivo influyeron significativamente en las propiedades edáficas evaluadas, generando cambios a nivel físico y químico, lo que podría aumentar la vulnerabilidad del suelo a la degradación. Se observó que los pastizales de *P. clandestinus* (C4), con un manejo del pastoreo de tipo extensivo, baja carga animal, presentaron mayor potencial para acumular C, reciclar N y mitigar el efecto del pisoteo, siempre y cuando, se garantice una gestión óptima del pastoreo, en términos de una carga animal, ambientalmente sostenible. El tipo de

cobertura vegetal y las prácticas de manejo asociadas promovieron cambios físicos y químicos, en los primeros centímetros del suelo, afectando la capacidad del suelo para almacenar C y N, lo que podría incidir en la provisión de Servicios Ecosistémicos.

Palabras clave: Carga animal; *Pennisetum clandestinum*; Monocultivo; Pastizales; Servicios ecosistémicos.

ABSTRACT

High Andean or high-mountain ecosystems are characterized by providing essential ecosystem services, many of them related to the soil. However, it is known that agricultural and livestock activities have led to progressive changes in the physical and chemical parameters of the soil and depletion of organic carbon and nitrogen, contributing to the loss of edaphic quality and increasing greenhouse gas emissions. This study evaluated the influence of three kinds of plant covers: native forest, *Pennisetum clandestinum* naturalized grassland, and *Allium fistulosum* monoculture, on some soil properties in a high Andean ecosystem of Valle del Cauca (Colombia). The edaphic properties measured were: bulk density, soil organic matter, C and N contents, and storage. It was found that the agricultural practices associated with monoculture significantly influenced the evaluated edaphic properties, generating changes at a physical and chemical level, which

could increase the vulnerability of the soil to degradation. It was observed that the grasslands of *P. clandestinus* (C4), with extensive grazing management, and a low stocking rate, presented the greater potential to accumulate C, recycle N and mitigate the trampling effect, as long as optimal management is guaranteed in terms of environmentally sustainable stocking load. The kind of vegetation cover and the associated management practices, promoted physical and chemical changes, in the first centimeters of the soil, affecting the soil's capacity to store C and N, which could affect the provision of Ecosystem Services.

Keywords: Animal load; *Pennisetum clandestinum*; Ecosystem services; Grassland; Monoculture.

INTRODUCCIÓN

La región andina de Colombia abarca 24,52 % del territorio nacional y se caracteriza por su alta diversidad y por tener paisajes complejos, en donde confluyen diferentes usos y niveles de intensificación del suelo, entre ellos, agroecosistemas de cultivos y pastizales para la producción ganadera (Rodríguez *et al.* 2006). En el Valle del Cauca, específicamente en la región de alta-montaña del municipio de El Cerrito, corregimiento de Tenerife, se pueden identificar paisajes diversos, en los que convergen áreas de conservación, monocultivos de cebolla de rama y ganadería bovina extensiva.

Las características climáticas, el tipo de vegetación y los suelos de las zonas de alta-montaña están relacionadas con una importante provisión de servicios ecosistémicos (SE), que brindan beneficios ecológicos, sociales y económicos, muchos de ellos, relacionados con el suelo, que ha estado sujeto a cambios, debido a la gestión e intensificación agropecuaria (Eze *et al.* 2018a; 2018b; Pérez *et al.* 2019; Piñeiro *et al.* 2010).

El suelo cumple un rol imprescindible no solo en la producción agraria, sino también en el equilibrio de los ecosistemas, a través de diversas funciones y SE esenciales, como el ciclaje de nutrientes, la regulación ambiental, la producción de alimentos y forrajes (Canedoli *et al.* 2020; Eze *et al.* 2018b), relacionados con los contenidos de carbono orgánico (COS) (Daynes *et al.* 2013) y nitrógeno del suelo (NS) (Duan *et al.* 2020). En las últimas décadas, el cambio del uso del suelo, sin tener en cuenta su potencial, lo ha expuesto a múltiples amenazas, afectando su función y capacidad de proveer SE (Viaud *et al.* 2018), generando reducción de la productividad (Bieluczyk *et al.* 2020), agotamiento progresivo de las reservas de COS y de NS e incremento de las emisiones de GEI (Bieluczyk *et al.* 2020; Duan *et al.* 2020).

El COS y el NS influyen en las propiedades físicas, químicas y biológicas, que combinados intervienen sobre el ciclo de otros nutrientes y propiedades emergentes (fertilidad, salud, sostenibilidad y resiliencia), que mejoran y conservan la productividad agrícola y la seguridad alimentaria (Wang *et al.* 2018). Ambos, se utilizan para evaluar la sostenibilidad e impactos de los agroecosistemas (Bieluczyk *et al.* 2020), debido a que sus contenidos están influenciados por procesos ecológicos, clima, topografía, tipo de

vegetación (C4 o C3), propiedades y gestión del suelo (Alves *et al.* 2020; Duan *et al.* 2020; Wang *et al.* 2018; Zhang *et al.* 2021).

El COS desempeña un importante papel en la regulación de SE de soporte, regulación y aprovisionamiento (Canedoli *et al.* 2020), por ello, desempeña funciones que afectan directa e indirectamente las condiciones químicas, físicas y biológicas del suelo (Alves *et al.* 2020; Bieluczyk *et al.* 2020), influyendo sobre la capacidad productiva edáfica, la mitigación del cambio climático y la seguridad alimentaria (Alves *et al.* 2020; Bondaruk *et al.* 2020; Canedoli *et al.* 2020). Por su parte, el NS está involucrado en diversas funciones edáficas y tiene una relación estrecha con el C, como componentes estructurales de la MOS; la dinámica del N puede restringir los flujos de C y la acumulación de COS (Piñeiro *et al.* 2010). Las principales entradas de N en los suelos son la hojarasca, la orina y el estiércol depositado por los animales, la fijación simbiótica y libre de N y la deposición de N₂ (Zhang *et al.* 2021).

La inadecuada gestión agrícola y la alta intensidad de pastoreo influyen en la dinámica del COS y NS (Alves *et al.* 2020; Eze *et al.* 2018a; 2018b), ya que muchas de las actividades de manejo sobre cultivos y pastizales buscan modificar el estado de algunas propiedades edáficas, generando condiciones óptimas para el crecimiento de las plantas (Eze *et al.* 2018a); sin embargo, podrían ser contraproducentes para la conservación de la calidad del suelo, con relación a la respuesta del COS y NS a diferentes manejos (Alves *et al.* 2020).

El objetivo de este estudio fue medir, en condiciones reales, el efecto de tres tipos de cobertura vegetal (bosque natural latifoliado, pastizal naturalizado de kikuyo y monocultivo de cebolla de rama), sobre los contenidos de C y N edáficos a diferente profundidad, en un agroecosistema altoandino del Valle del Cauca-Colombia.

MATERIALES Y MÉTODOS

Caracterización del área de estudio. El estudio se desarrolló en un agroecosistema ubicado en Tenerife, municipio de El Cerrito Valle del Cauca-Colombia, N 3°42'55", O 76°04'44"2", entre los 2.200 y 3.000 m s.n.m., precipitación de 1300 mm/año y temperatura media de 14 °C; zona de influencia de los páramos: Las Hermosas, Las Domínguez, Pan de Azúcar y Valle Bonito (CVC & FUNAGUA, 2011). A través de la recolección de información biofísica-productiva y georreferenciación del predio, se identificaron tres tipos de coberturas vegetales predominantes:

- Relictos de vegetación nativa, dentro de un ecosistema de Bosque frío húmedo en montaña fluvio-gravitacional (BOFHUMH) del Oroboma medio de Los Andes (CVC & FUNAGUA, 2011), con registros de flora, como *Ceroxylon alpinum* Bonpl. ex DC. (Arecaceae), *Beilschmiedia tovarensis* (Klotzsch & H. Karst. ex Meisn.) Sach. Nishida (Lauraceae), *Trophis caucana* (Pittier) C.C. Berg (Moraceae), *Montanoa quadrangularis* Schultz Bipontianus (Asteraceae), *Juglans neotropica* Diels (Juglandaceae), *Cecropia telealba* Cuatrec (Urticaceae) (CVC & FUNAGUA, 2011).

- b) Pastizales naturalizados, con predominancia de *Pennisetum clandestinum* Hochst. ex Chiov. (Poaceae) (>100 años de edad), con escasa presencia de árboles y ejemplares de Palma de Cera, *C. alpinum*; ganadería tipo extensiva, con una carga animal promedio de 0,54 unidad animal por hectárea (UA/ha), en áreas de ladera. Con división de potreros y rotación de los bovinos según la disponibilidad forrajera.
- c) Monocultivos de cebolla *Allium fistulosum* L. (Amaryllidaceae), (establecidos >45 años), sobre un relieve ligeramente ondulado (pendientes <7 %), caracterizados por un manejo de labranza convencional, aplicación constante de gallinaza, enmiendas para corregir el pH del suelo y biocidas para el control de plagas y enfermedades. Representando la principal actividad agrícola y económica de los productores de la zona.

Criterios para la selección de los sitios de muestreo. Los sitios de muestreo se seleccionaron, de acuerdo con los criterios que se presentan en la tabla 1. Para cada una de las zonas de muestreo, se tomaron tres muestras a dos profundidades (n = 42). Los porcentajes de pendiente, se determinaron según lo establecido por la Corporación Regional Autónoma del Valle del Cauca (CVC), que indica que suelos aptos para el pastoreo tienen pendientes < 25 %.

Tabla 1. Criterios de selección de los sitios de muestreo, con el fin de medir el efecto de tres tipos de cobertura vegetal (bosque natural, pastizal naturalizado de kikuyo y monocultivo de cebolla de rama), sobre los contenidos de C y N edáficos, en un ecosistema altoandino del Valle del Cauca, Colombia.

Criterios			Abreviatura	
Cobertura vegetal	Altitud (m s.n.m.)	Pendiente (%)		
Bosque Natural	BN*	A (2.800-2.900)	-	BNA
		B (2.600-2.700)	-	BNB
Pastizales	P	A (2.800-2.900)	p1 (<25)	PAp1
		A (2.800-2.900)	p2 (>25)	PAp2
		B (2.600-2.700)	p1 (<25)	PBp1
		B (2.600-2.700)	p2 (>25)	PBp2
Monocultivo de cebolla	MC	2.200-2.300	-	MC

* En BN solo se consideró la altitud como variable determinante, debido a que el porcentaje de la pendiente de esta zona siempre fue > 25 %.

Análisis estadístico. Se llevó a cabo un ANOVA, a través del procedimiento GLM, estableciendo las significancias estadísticas de los factores: cobertura vegetal y profundidad de muestreo; las diferencias entre medias fueron comparadas mediante prueba de Duncan (P <0,05) y la relación entre las variables mediante los coeficientes de correlación de Pearson (r) (5 %), a través del software estadístico SAS® 9.4.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Propiedades físicas y químicas del suelo

Densidad aparente (DA). Entre las profundidades de muestreo del suelo se encontraron diferencias; se detectó que, a medida

Muestreo y análisis de suelos

Propiedades físicas y químicas. Los muestreos del suelo se realizaron a dos profundidades: 0-10 cm y de 10-20 cm. Las muestras fueron secadas a temperatura ambiente (24 °C), molidas y tamizadas (2,0 mm). La densidad aparente se midió utilizando el método del anillo volumétrico (Blake & Hartge, 1986); la materia orgánica del suelo con el método de Walkley & Black (1934); el pH por agua 1:1 (Collins *et al.* 1970) y la capacidad de intercambio catiónico por amonio acetato (Rhoades, 1982).

Contenidos de carbono y nitrógeno. Los porcentajes de carbono y nitrógeno total se determinaron por combustión seca. Los almacenamientos de COS y NT (Mg/ha), se calcularon con base en las ecuaciones de Abdalla *et al.* (2018) y Eze *et al.* (2018b), donde COS = carbono orgánico del suelo, NT: nitrógeno total, C: carbono (%), N: nitrógeno (%), DA: densidad aparente (g/cm³) y p: profundidad del suelo (cm).

$$\text{Almacenamiento COS (Mg/ha)} = C \times DA \times p \quad \text{Ecuación 1}$$

$$\text{Almacenamiento NT (Mg/ha)} = N \times DA \times p \quad \text{Ecuación 2}$$

que aumentó la profundidad del suelo, también incrementó la DA (Tabla 2), asociado con que la biomasa radical de las plantas disminuye y, con ello, se reduce la actividad de la fauna edáfica y los contenidos de COS y MOS; resultados similares fueron reportados por Daza Torres *et al.* (2014) y Zhang *et al.* (2021).

No hubo diferencias entre las coberturas vegetales BN y P, pero sí con MC, que presentó valores más altos (Tabla 2). La mayor DA en MC se asoció con las prácticas de manejo que, a través del tiempo, han cambiado las propiedades físicas, químicas y biológicas (Daynes *et al.* 2013). A pesar de las aplicaciones permanentes de material orgánico al monocultivo por parte del productor, la perturbación del suelo, la escasa cobertura vegetal acompañante y la intensidad de labranza, se refleja en el agotamiento de MOS, resultando en

Tabla 2. Valores medios de densidad aparente, pH, capacidad de intercambio catiónico y materia orgánica del suelo en las coberturas: bosque natural, pastizales y monocultivo de cebolla, en un ecosistema altoandino del Valle del Cauca, Colombia.

Cobertura vegetal	DA			pH			CIC			MOS				
	g/cm ³			H ₂ O			cmol/kg			g/kg				
	-	X		0-10 cm	10-20 cm		-	X		0-10 cm	10-20 cm		-	X
BNA	0,57 ± 0,1C	0,54 ± 0,1Bb	0,60 ± 0,1a	5,92 ± 0,2DE	5,83 ± 0,1a	46,55 ± 10,8A	49,57 ± 11,1a	43,53 ± 10,4b	186,13 ± 17,4a	132,84 ± 27,7b				
BNB	0,68 ± 0,1BC	0,53 ± 0,0Bb	0,84 ± 0,1a	6,46 ± 0,2B	6,38 ± 0,2a	33,03 ± 8,4B	39,10 ± 7,2a	26,97 ± 9,7b	170,49 ± 26,8a	99,61 ± 45,9b				
PAp1	0,62 ± 0,0BC	0,61 ± 0,0Bb	0,63 ± 0,1a	6,08 ± 0,0DC	6,12 ± 0,0a	46,12 ± 2,9A	46,07 ± 3,0a	46,17 ± 2,9b	208,74 ± 11,2a	188,37 ± 23,7b				
PAp2	0,60 ± 0,1BC	0,58 ± 0,0Bb	0,62 ± 0,1a	6,13 ± 0,1C	6,21 ± 0,1a	48,8 ± 3,9A	52,80 ± 5,4a	44,80 ± 2,3b	226,06 ± 15,4a	178,77 ± 16,8b				
PBp1	0,63 ± 0,1BC	0,58 ± 0,1Bb	0,67 ± 0,1a	5,88 ± 0,1E	5,93 ± 0,1a	43,35 ± 3,1AB	45,60 ± 3,9Aa	41,10 ± 2,3b	225,82 ± 23,3a	163,03 ± 19,1b				
PBp2	0,7 ± 0,1B	0,61 ± 0,0Bb	0,80 ± 0,1a	5,79 ± 0,1E	5,84 ± 0,1a	45,48 ± 6,2A	47,40 ± 5,0a	43,57 ± 7,4b	195,34 ± 9,1a	163,79 ± 8,1b				
MC	1,13 ± 0,1A	1,09 ± 0,1Ab	1,16 ± 0,1a	6,95 ± 0,1A	6,89 ± 0,1a	18,16 ± 3,9C	17,85 ± 4,0a	18,47 ± 3,8b	62,39 ± 8,3a	59,22 ± 8,9b				

Valores medios (\pm error estándar). Profundidad de muestreo: 0-10 y 10-20 cm. DA: densidad aparente. pH: potencial de hidrógeno en agua. CIC: capacidad de intercambio catiónico. MOS: materia orgánica del suelo. Las letras mayúsculas comparan las coberturas vegetales (BN, P y MC) y la minúsculas comparan las profundidades de muestreo, mediante la prueba Duncan ($P < 0,05$). Medias con la misma letra no presentan diferencias significativas.

cambios de características físicas, como la DA (Daza Torres *et al.* 2014; Ordoñez *et al.* 2015) y una mayor compactación (Canedoli *et al.* 2020; Lin *et al.* 2020). Se observaron correlaciones negativas entre DA con MOS, COS y N (Figura 1), resultados que coinciden con los reportados por Ordoñez *et al.* (2015) y Zhang *et al.* (2021).

No hubo diferencias significativas entre los valores de DA en BN y P. La DA encontrada en P, se relacionó con la baja carga animal y la cobertura vegetal permanente de *P. clandestinus* que, por su hábito de crecimiento estolonífero, promueve la porosidad (Muñoz *et al.* 2014), aumenta los contenidos de MOS y crea un colchón que mitiga

Variables		pH	MO	CIC	%C	StockC	%N	DA
MO	r	-0.66233	1					
	p	<.0001						
CIC	r	-0.69836	0.90627	1				
	p	<.0001	<.0001					
%C	r	-0.56237	0.97973	0.86416	1			
	p	0.0001	<.0001	<.0001				
StockC	r	-0.11843	0.44219	0.29924	0.54878	1		
	p	0.4551	0.0034	0.0542	0.0002			
%N	r	-0.64582	0.97766	0.85868	0.96264	0.44485	1	
	p	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	0.0032		
DA	r	0.66403	-0.83920	-0.84299	-0.76016	0.08543	-0.80145	1
	p	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	0.5906	<.0001	

Figura 1. Correlaciones de Pearson significativas ($P < 0,05$) para propiedades del suelo. pH: pH, MO: Materia Orgánica, CIC: Capacidad de Intercambio Catiónico, %C: porcentaje de carbono, StockC: almacenamiento de C, %N: porcentaje de nitrógeno, DA: densidad aparente en las coberturas: bosque natural, pastizales y monocultivo de cebolla, en un ecosistema altoandino del Valle del Cauca, Colombia.

el impacto del pisoteo del ganado (Pérez *et al.* 2019), disminuyendo la susceptibilidad a la compactación, resultados que coinciden con estudios realizados en ecosistemas ganaderos similares del país (Molina-Benavides & Sánchez-Guerrero, 2017; Ordoñez *et al.* 2015).

pH. No hubo diferencias significativas del pH del suelo en las profundidades evaluadas. A nivel de coberturas vegetales y altitud se presentaron diferencias (Tabla 2). El pH del suelo en BN y P, según la clasificación Soil Survey Division Staff, estuvo entre mediana y ligeramente ácido; en MC, se encontró un pH neutro, asociado a las labores agrícolas desarrolladas. De acuerdo con Viaud *et al.* (2018) y Whalen *et al.* (2000), las prácticas culturales, como la aplicación de enmiendas y la fertilización de los monocultivos, pueden generar cambios en el pH del suelo, lo que podría modificar, entre otras funciones, la acumulación de C. Eze *et al.* (2018b) señalan que las condiciones ácidas, junto con la humedad edáfica natural podrían potencializar los contenidos y el almacenamiento de C en zonas de alta-montaña.

La tendencia a la acidez en BN y P coinciden con otros estudios desarrollados en ecosistemas de alta-montaña del país, como, por ejemplo, Muñoz *et al.* (2014) y Ordoñez *et al.* (2015). Los suelos de alta-montaña, se caracterizan por ser naturalmente ácidos por su origen volcánico (Ordoñez *et al.* 2015). La acidez del suelo es una propiedad relacionada con la dinámica del C, pues este tiende a acumularse en condiciones ácidas, debido a la restringida descomposición de materiales orgánicos (Eze *et al.* 2018b). Se ha reportado que pastizales con suelos de pH ácido, en los primeros 15 cm de profundidad, pueden almacenar más C (82 Mg/ha/año), en comparación a pastizales con suelos neutros (61 Mg/ha/año) (Carey *et al.* 2008). Leifeld *et al.* (2013) sostienen que el pH del suelo debería ser clave en la evaluación de la renovación global de C y N, ya que por cada unidad de pH de acidificación se podría

augmentar el tiempo promedio de residencia de los depósitos de COS, del 22 al 86 %.

Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC). Se evidenciaron diferencias entre las profundidades evaluadas. Entre BNA y P no se encontraron diferencias significativas, pero sí con BNB y MC (Tabla 2). Los valores medios de CIC (cmol/kg) en P fueron: PAp2: 48,8; PAp1: 46,1; PBp2: 45,5; PBp1: 43,3; para los bosques BNA: 46,5 y BNB: 33,0 y para MC: 18,1. Los valores altos de CIC en P y BN, se asociaron con la relación directa de CIC con MOS y COS (Figura 1), debido a que MOS y C son responsables entre el 25 y 90 % de la CIC total de las capas superficiales en suelos minerales (Gómez-Vargas *et al.* 2017).

Materia Orgánica del Suelo (MOS). Hubo diferencias entre coberturas vegetales (Figura 2) y profundidades; la pendiente no incidió sobre los contenidos de MOS en P (Tabla 2). A medida que aumentó la profundidad disminuyeron los contenidos de MOS y se asoció al aporte directo de MO de la biomasa radical, así como las poblaciones edáficas, que son más activas en la rizosfera y disminuyen a medida que se profundiza en el perfil del suelo.

Los contenidos de MOS en BN y P fueron más altos en comparación con MC. En PAp1, PAp2 y PBp1, se encontraron medias superiores a 194 g/kg (198,56; 202,42; 194,43 g/kg, respectivamente), mientras que, en BNA, BNB y PBp2, los contenidos de MOS estuvieron entre 135 y 180 g/kg (159,48; 135,05; 179,57 g/kg, respectivamente). En contraste, el contenido de MOS en MC fue de 60,81 g/kg. Estos resultados evidencian un efecto directo de las prácticas de manejo sobre las cantidades de MOS (Viaud *et al.* 2018), más cuando promueven la perturbación y la descomposición de MOS, COS y NS (Wang *et al.* 2018).

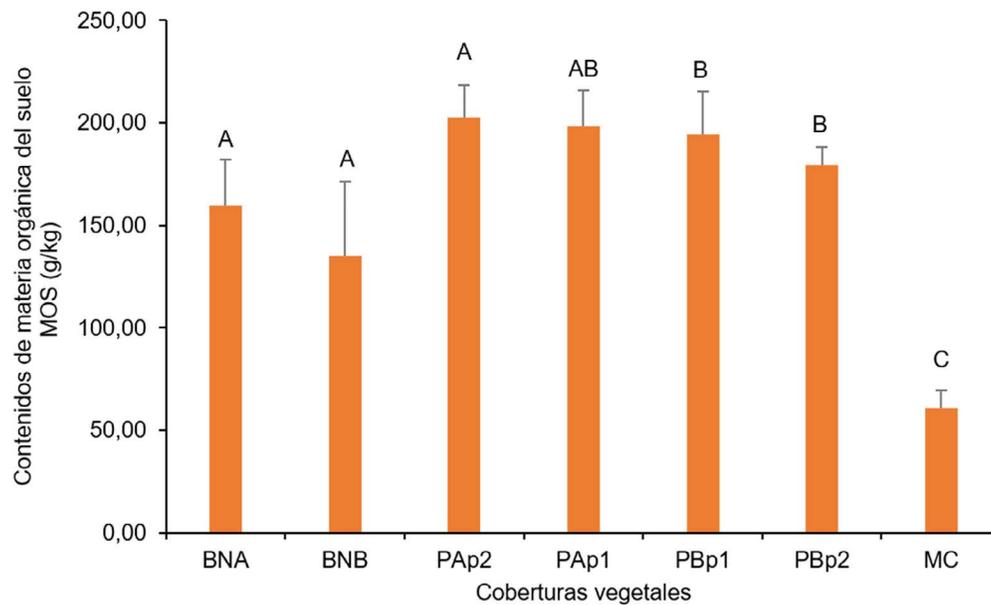


Figura 2. Contenidos de materia orgánica del suelo (0-20 cm) en las coberturas: bosque natural, pastizales y monocultivo de cebolla, en un ecosistema altoandino del Valle del Cauca, Colombia.

Las letras mayúsculas comparan las coberturas vegetales (BN, P y MC), mediante la prueba Duncan ($P < 0,05$). Medias con la misma letra no presentaron diferencias significativas.

Los mayores contenidos de MOS en P en comparación a BN, se asociaron con entradas permanentes de C y N al suelo (Bondaruk *et al.* 2020), relacionados con el tipo de vegetación (C4), el hábito de crecimiento, el aporte de biomasa de las raíces (Leifeld *et al.* 2013), la alta capacidad de rebrote del *P. clandestinus* (Pérez *et al.* 2019), las deposiciones de excretas/orina (Bieluczky *et al.* 2020) y el efecto del pastoreo, que conlleva a una permanente muerte y renovación de raíces, favoreciendo la acumulación de MOS (Daynes *et al.* 2013; Viaud *et al.* 2018). Estos hallazgos, se han reportado para *Urochloa brizantha* (Hochst ex a. Rich.) Stapf cv Piata, en Brasil (Bieluczky *et al.* 2020); en pastizales de ryegrass *Lolium perenne* L. (Poaceae), en Francia (Viaud *et al.* 2018) y *P. clandestinus*, en Colombia (Pérez *et al.* 2019).

Contenido y almacenamiento de carbono y nitrógeno. Los contenidos de C y N presentaron diferencias entre coberturas vegetales y profundidades (Figura 3; Tabla 3). La pendiente no tuvo efecto sobre los porcentajes de C y N en P. Los P presentaron valores más altos de C y N en comparación con los BN y MC (Figura 3). Aunque no hubo diferencias entre los P, se evidenció un efecto positivo de la altitud sobre los contenidos de C y N, ya que los pastizales ubicados a mayor altitud (2.800-2.900 m s.n.m.) presentaron mayores porcentajes de C (PAp2: 12,1; PAp1: 11,8) y N (PAp1: 1,17, PAp2: 1,29), en comparación a los P de la altitud B (2-600-2-700 m s.n.m.), PBp1: 11,8 %; PBp2: 10,8 % de C, y PBp1: 1,19 %, PBp2: 1,05 % de N. Zhang *et al.* (2021) señalan que las existencias de C y N están afectadas por el clima, la altitud y el tipo de vegetación. MC presentó menores contenidos de C y N (3,5 y 0,25 %, respectivamente), demostrando que las labores agrícolas intensivas pueden agotar la MOS y tener implicaciones negativas sobre los contenidos de C y N, la fertilidad y estructura (Alves *et al.* 2020; Eze *et al.* 2018a; Piñeiro *et al.* 2010).

Hubo una relación estrecha entre los contenidos de C y N (Figura 1), lo que concuerda con Lin *et al.* (2020), Piñeiro *et al.* (2010) y Zhang *et al.* (2021), quienes informaron que los cambios en las existencias (agotamiento o acumulación) de C o N, generalmente, promueve pérdidas o ganancias del otro elemento, cambios en C:N, a mediano-largo plazo y que el potencial de captura de COS está reforzado por la acumulación de N. Estudios en agroecosistemas de alta-montaña en Colombia reportaron pastizales con contenidos de COS y N similares y mayores, que cultivos y/o bosques de la región (Muñoz *et al.* 2014; Ordoñez *et al.* 2015; Valenzuela B. & Visconti M., 2018).

Los contenidos de C y N en los BN no presentaron diferencias entre ellos (BNA: 9,6 % BNB: 8,2 % de C y BNA: 0,84 %, BNB: 0,73 % de N); se esperaba que los porcentajes de C y N, en BN fueran superiores a los de P, pero los resultados mostraron que en P hubo mayores contenidos de C y N; coincidiendo con Ordoñez *et al.* (2015). Estos resultados, se asociaron con las características diferenciadas entre la vegetación del bosque (mayoritariamente C3) y los pastizales (C4), así como a la distribución radical y el lugar de depósito de la biomasa, que en los bosques permanece durante un largo periodo sobre el suelo como mantillo (Pérez *et al.* 2019; Ordoñez *et al.* 2015), mientras que, en los pastizales, se deposita dentro del suelo.

El aumento de los niveles de COS en pastizales tropicales (C4), como *P. clandestinus*, está relacionado a la capacidad del pasto para adaptarse y compensar la acción del pastoreo (Abdalla *et al.* 2018), la alta biomasa radical, que favorece el aporte e incremento de COS en los primeros centímetros del suelo (Canedoli *et al.* 2020; Pérez *et al.* 2019) y el almacenamiento de nutrientes, en comparación a sistemas de cultivos no perennes o pastizales, dominados por C3 y/o pastizales mixtos (C3/C4) (Abdalla *et al.* 2018).

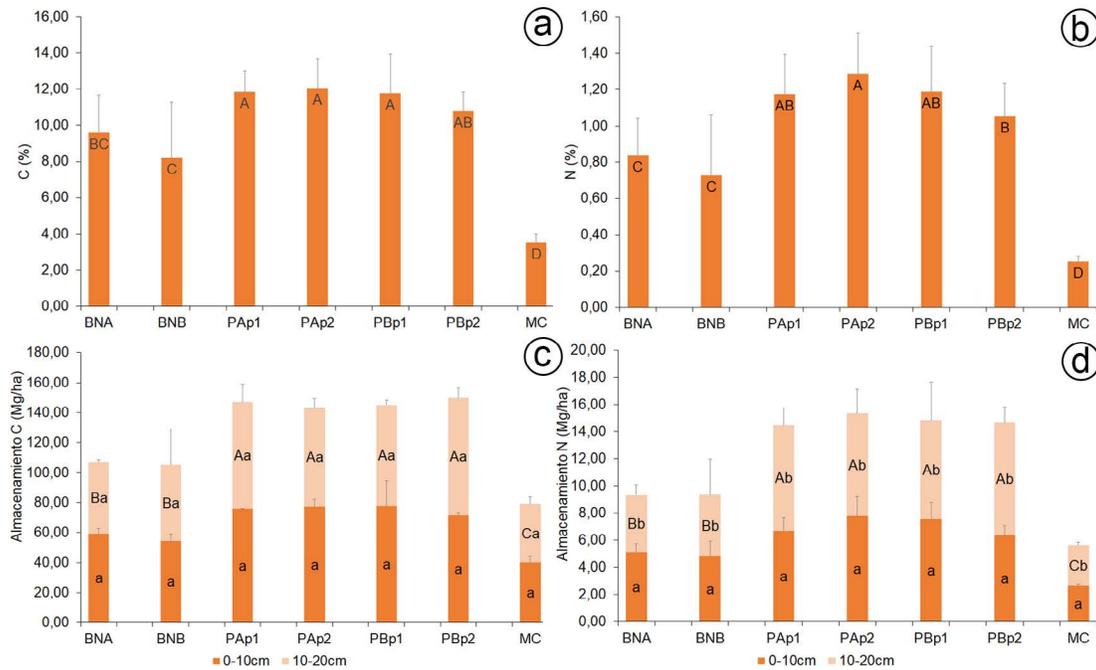


Figura 3. Contenidos y almacenamiento de carbono y nitrógeno del suelo en las coberturas: bosque natural, pastizales y monocultivo de cebolla, en un ecosistema altoandino del Valle del Cauca, Colombia. a) Porcentajes de carbono; b) Porcentajes de nitrógeno; c) almacenamiento de carbono; d) almacenamiento de nitrógeno.

Las letras mayúsculas comparan las coberturas vegetales (BN, P y MC) y las minúsculas comparan las profundidades de muestreo, mediante la prueba Duncan ($P < 0,05$). Medias con la misma letra no presentan diferencias significativas.

Tabla 3. Carbono, nitrógeno y C:N en las coberturas: bosque natural, pastizales y monocultivo de cebolla, en un ecosistema altoandino del Valle del Cauca, Colombia, a dos profundidades de muestreo.

Cobertura vegetal	C %		N %		C:N	
	0-10 cm	10-20 cm	0-10 cm	10-20 cm	0-10 cm	10-20 cm
BNA	11,1 ± 1,1a	8,1 ± 1,7b	1,0 ± 0,2a	0,7 ± 0,2b	11,7 ± 0,9b	11,6 ± 2,3a
BNB	10,3 ± 1,6a	6,1 ± 2,8b	0,9 ± 0,3a	0,5 ± 0,3b	11,6 ± 1,8b	15,9 ± 13,7a
PBp1	13,5 ± 1,5a	10,1 ± 1,0b	1,3 ± 0,1a	1,1 ± 0,3b	10,3 ± 0,6b	10,1 ± 3,4a
PBp2	11,7 ± 0,6a	9,9 ± 0,3b	1,1 ± 0,2a	1,1 ± 0,2b	11,3 ± 1,5b	9,7 ± 1,9a
PAp1	12,5 ± 0,5a	11,2 ± 1,4b	1,1 ± 0,1a	1,3 ± 0,3b	11,5 ± 1,7b	9,3 ± 2,1a
PAp2	13,3 ± 0,9a	10,8 ± 1,0b	1,3 ± 0,3a	1,2 ± 0,2b	10,1 ± 1,4b	9,1 ± 2,3a
MC	3,6 ± 0,5a	3,4 ± 0,5b	0,2 ± 0,0a	0,3 ± 0,0b	15,1 ± 1,0b	13,1 ± 2,1a

Valores medios (\pm error estándar). Carbono (C), Nitrógeno (N), relación carbono:nitrógeno (C:N). Profundidad de muestreo: 0-10 y 10-20 cm. Las letras minúsculas comparan las profundidades de muestreo, mediante la prueba Duncan ($P < 0,05$). Medias con la misma letra no presentan diferencias significativas.

Frank (2020) y Pérez *et al.* (2019) señalan que los contenidos y la disponibilidad de C y N en los pastizales, se pueden atribuir a que: a) los ungulados favorecen la acumulación de C, aportando MOS y nutrientes, por la adición de heces-orina y la muerte de raíces en respuesta al pastoreo, además transforman el N vegetal a formas más disponibles; b) el pastoreo aumenta la exudación de compuestos orgánicos lábiles, que estimulan la actividad microbiana, las tasas de mineralización y la disponibilidad de N inorgánico; además conserva la humedad del suelo, factor que favorece la disponibilidad de NS (Frank, 2020).

Hubo diferencias en el almacenamiento de C y N entre las coberturas vegetales (Figura 3). No se evidenciaron diferencias del almacenamiento de C entre profundidades, contrario al almacenamiento de N, en donde la profundidad del suelo, sí tuvo un efecto significativo. Los P presentaron mayor almacenamiento de C y N (Mg/ha), seguido de BN y MC (Figura 3). Los bajos valores en MC, además de estar relacionados con la gestión del suelo (Piñeiro *et al.* 2010), se podrían asociar con la duración del cultivo, pues se ha encontrado que los cultivos anuales o semestrales tienen menor capacidad de almacenar C, en comparación a las plantas perennes (Pérez *et al.* 2019).

La capacidad de almacenamiento de C y N de los P permite inferir que los pastizales pueden ser una opción viable para proveer beneficios (tanto ambientales como económicos) (Piñeiro *et al.* 2010). Según Eze *et al.* (2018b), los pastizales de alta-montaña, en los primeros 15 cm de profundidad, pueden almacenar cantidades significativas de COS ($58,93 \pm 3,50$ a $100,69 \pm 8,64$ Mg/ha) y se ha sugerido que *P. clandestinus*, por su alta capacidad de producción de biomasa aérea y subterránea, se podría considerar una gramínea importante en el secuestro de C y en la mitigación de la emisión de GEI (Pérez *et al.* 2019), siempre y cuando sea gestionada con prácticas de manejo adecuadas (Pérez *et al.* 2019) y bajo un sistema de pastoreo, ambientalmente sostenible (Alves *et al.* 2020; Soussana & Lemaire, 2014), buscando el equilibrio entre lo ambiental y lo económico-productivo.

El potencial de los bosques y pastizales altoandinos para secuestrar C hacen que estos sean claves en la mitigación del cambio climático, el mejoramiento de la salud del suelo y la provisión de SE (Canedoli *et al.* 2020). Es necesario evaluar pastizales en ecosistemas similares con mayores intensidades de pastoreo, así como la estabilidad del C y N almacenado, ajustando una carga animal, ambientalmente sostenible, que tenga en cuenta la oferta ecosistémica y la demanda productiva.

El tipo de cobertura vegetal y las prácticas de manejo asociadas promovieron cambios físicos y químicos edáficos, en los primeros centímetros de profundidad, afectando la capacidad del suelo para almacenar C y N, lo que podría incidir en la provisión de SE. Se sugiere, que la gestión de los agroecosistemas debería promover integridad edáfica, conservación de la MOS, almacenamiento de C y N, aplicando enfoques básicos de cuidado del suelo, integración de cultivos y cobertura vegetal multipropósito permanente. Finalmente, estos resultados pueden dar una visión distinta de la ganadería, pues con una gestión ajustada a las condiciones ecosistémicas específicas, podría ser una aliada multifuncional, para mitigar el cambio climático, ofrecer SE y seguridad alimentaria.

Agradecimientos. A Minciencias y a la Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira, por la financiación. Conflicto de intereses: El manuscrito fue preparado y revisado por los autores, quienes declaramos que no existe ningún conflicto que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados.

REFERENCIAS

1. ABDALLA, M.; HASTINGS, A.; CHADWICK, D.R.; JONES, D.L.; EVANS, C.D.; JONES, M.B.; REES, R.M.; SMITH, P. 2018. Critical review of the impacts of grazing intensity on soil organic carbon storage and other soil quality indicators in extensively managed grasslands. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 253:62-81. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.10.023>
2. ALVES, L.A.; DENARDIN, L.G. DE O.; MARTINS, A.P.; BAYER, C.; VELOSO, M.G.; BREMM, C.; CARVALHO, P.C. DE F.; MACHADO, D.R.; TIECHER, T. 2020. The effect of crop rotation and sheep grazing management on plant production and soil C and N stocks in a long-term integrated crop-livestock system in Southern Brazil. *Soil and Tillage Research*. 203:104678. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104678>
3. BIELUCZYK, W.; DE CÁSSIA PICCOLO, M.; PEREIRA, M. G.; DE MORAES, M.T.; SOLTANGHEISI, A.; BERNARDI, A.C. DE C.; PEZZOPANE, J.R.M.; OLIVEIRA, P.P.A.; MOREIRA, M.Z.; CAMARGO, P.B.; DOS SANTOS DIAS, C.T.; BATISTA, I.; CHERUBIN, M.R. 2020. Integrated farming systems influence soil organic matter dynamics in southeastern Brazil. *Geoderma*. 371:114368. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114368>
4. BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. 1986. Bulk density. In: Klute, A. (Ed.). *Methods of Soil Analysis Part 1 Physical and Mineralogical Methods*. 2 Ed. American Society of Agronomy, Inc.; Soil Science Society of America, Inc. p.363-375. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c13>
5. BONDARUK, V.; LEZAMA, F.; DEL PINO, A.; PIÑEIRO, G. 2020. Overseeding legumes in natural grasslands: Impacts on root biomass and soil organic matter of commercial farms. *Science of the Total Environment*. 743:140771. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140771>
6. CANEDOLI, C.; FERRÈ, C.; ABU EL KHAIR, D.; COMOLLI, R.; LIGA, C.; MAZZUCHELLI, F.; PROIETTO, A.; ROTA, N.; COLOMBO, G.; BASSANO, B.; VITERBI, R.; PADOA-SCHIOPPA, E. 2020. Evaluation of ecosystem services in a protected mountain area: Soil organic carbon stock and biodiversity in alpine forests and grasslands. *Ecosystem Services*. 44:101135. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101135>
7. CAREY, P.D.; WALLIS, S.; CHAMBERLAIN, P.M.; COOPER, A.; EMMETT, B.A.; MASKELL, L.C.; MCCANN, T.; MURPHY, J.; NORTON, L.R.; REYNOLDS, B.; SCOTT, W.A.; SIMPSON, I.C.; SMART, S.M.; ULLYETT, J.M. 2008. Chapter 4 Semi-Natural grasslands: neutral, calcareous and acid grassland broad habitats. In: *Countryside Survey: UK Results from 2007*. Countryside Survey. p.38-49.
8. COLLINS, J.B.; WHITESIDE, E.P.; CRESS, C.E. 1970. Seasonal variability of pH and lime requirements in several Southern Michigan soils when measured in different ways. *Soil Science Society of America Journal*. 34(1):56-61. <https://doi.org/10.2136/sssaj1970.03615995003400010018x>
9. CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA, CVC.; FUNDACIÓN AGUA VIVA, FUNAGUA. 2011. Planes de manejo para la conservación de 22 especies focales de plantas en el departamento del Valle del Cauca. CVC-FUNAGUA (Cali-Colombia). 258p.

10. DAYNES, C.N.; FIELD, D.J.; SALEEBA, J.A.; COLE, M.A.; MCGEE, P.A. 2013. Development and stabilisation of soil structure via interactions between organic matter, arbuscular mycorrhizal fungi and plant roots. *Soil Biology and Biochemistry*. 57:683-694.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.09.020>
11. DAZA TORRES, M.C.; HERNÁNDEZ FLÓREZ, F.; TRI-ANA, F.A. 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>
12. DUAN, B.; MAN, X.; CAI, T.; XIAO, R.; GE, Z. 2020. In-creasing soil organic carbon and nitrogen stocks along with secondary forest succession in permafrost region of the Daxing'an mountains, northeast China. *Global Ecology and Conservation*. 24:e01258.
<https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01258>
13. 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>
14. 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>
15. FRANK, D.A. 2020. Grazing effects on plant nitrogen use in a temperate grassland. *Rangeland Ecology and Management*. 73(4):482-490.
<https://doi.org/10.1016/j.rama.2020.03.002>
16. GÓMEZ-VARGAS, R.M.; HERNÁNDEZ-HOYOS, E.R.; GUARDIOLA-PERILLA, M.L.; BONILLA-CORREA, C.R. 2017. Dinámica entre propiedades químico-físicas y biológicas del suelo como respuesta a diferentes insumos orgánicos. *Suelos Ecuatoriales*. 47(1-2):53-60.
17. LEIFELD, J.; BASSIN, S.; CONEN, F.; HAJDAS, I.; EGLI, M.; FUHRER, J. 2013. Control of soil pH on turnover of belowground organic matter in subalpine grassland. *Biogeochemistry*. 112:59-69.
<https://doi.org/10.1007/s10533-011-9689-5>
18. LIN, D.; MCCULLEY, R.L.; NELSON, J.A.; JACOBSEN, K.L.; ZHANG, D. 2020. Time in pasture rotation alters soil microbial community composition and function and increases carbon sequestration potential in a temperate agroecosystem. *Science of the Total Environment*. 698:134233.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134233>
19. MOLINA-BENAVIDES, R.A.; SÁNCHEZ-GUERRERO, H. 2017. Sostenibilidad de sistemas ganaderos bovinos de alta montaña en Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*. 8(2):29-36.
<https://doi.org/10.22490/21456453.2028>
20. MUÑOZ, F.A.; PEREZ, E.H.; OTERO S., J.D. 2014. Susceptibilidad a la erosión hídrica de suelos en la zona andina del departamento del Cauca Colombia. *Revista de Investigaciones, Universidad del Quindío*. 26(1):45-50.
21. ORDOÑEZ, M.C.; GALICIA, L.; FIGUEROA, A.; BRAVO, I.; PEÑA, M. 2015. Effects of peasant and indigenous soil management practices on the biogeochemical properties and carbon storage services of Andean soils of Colombia. *European Journal of Soil Biology* 71:28-36.
<https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2015.10.001>
22. PÉREZ, M.; MEDINA, M.F.; HURTADO, A.; ARBOLEDA, E.M.; MEDINA, M. 2019. Reservas de carbono del pasto *Cenchrus clandestinus* (Poaceae) en los sistemas de manejo tradicional y silvopastoril, en diferentes relieves. *Revista de Biología Tropical*. 67(4):769-783.
<https://doi.org/10.15517/rbt.v67i4.34529>
23. PIÑEIRO, G.; PARUELO, J.M.; OESTERHELD, M.; JOBBÁGY, E.G. 2010. Pathways of grazing effects on soil organic carbon and nitrogen. *Rangeland Ecology and Management*. 63(1):109-119.
<https://doi.org/10.2111/08-255.1>
24. RHOADES, J. 1982. Cation exchange capacity. In: Page, A.L. (Ed.). *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. American Society of Agronomy, Inc.; Soil Science Society of America. Inc. p.149-157.
<https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c8>
25. RODRÍGUEZ, N.; ARMENTERAS, D.; MORALES, M.; ROMERO, M. 2006. *Ecosistemas de los Andes colombianos*. Segunda edición. Instituto Alexander Von Humbolt-IAvH (Bogotá-Colombia). 154p.
26. SOUSSANA, J.-F.; LEMAIRE, G. 2014. Coupling carbon and nitrogen cycles for environmentally sustainable intensification of grasslands and crop-livestock systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 190:9-17.
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.10.012>
27. VALENZUELA B., I.G.; VISCONTI M., E.F. 2018. Influencia del clima, uso del suelo y profundidad sobre el contenido de carbono orgánico en dos pisos altitudinales andinos del departamento Norte de Santander, Colombia. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*. 12(1):233-243.
<https://doi.org/10.17584/rcch.2018v12i1.7349>

28. VIAUD, V.; SANTILLÀN-CARVANTES, P.; AKKAL-CORFINI, N.; LE GUILLOU, C.; PRÉVOST-BOURÉ, N.C.; RANJARD, L.; MENASSERI-AUBRY, S. 2018. Landscape-scale analysis of cropping system effects on soil quality in a context of crop-livestock farming. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 265:166-177. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.06.018>
29. 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>
30. WANG, S.; ADHIKARI, K.; WANG, Q.; JIN, X.; LI, H. 2018. Role of environmental variables in the spatial distribution of soil carbon (C), nitrogen (N), and C:N ratio from the northeastern coastal agroecosystems in China. *Ecological Indicators*. 84:263-272. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.08.046>
31. WHALEN, J.K.; CHANG, C.; CLAYTON, G.W.; CARE-FOOT, J.P. 2000. Cattle manure amendments can increase the pH of acid soils. *Soil Science Society of America Journal*. 64(3):962-966. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.643962x>
32. ZHANG, Y.; AI, J.; SUN, Q.; LI, Z.; HOU, L.; SONG, L.; TANG, G.; LI, L.; SHAO, G. 2021. Soil organic carbon and total nitrogen stocks as affected by vegetation types and altitude across the mountainous regions in the Yunnan Province, south-western China. *Catena*. 196:104872. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104872>