



Relación del carbono orgánico y el nitrógeno total con otras variables del suelo en ganaderías del departamento de Antioquia, Colombia

Relationship of organic carbon and total nitrogen with other soil variables in livestock in the department of Antioquia, Colombia

Manuela Ortega-Monsalve¹ ; Marisol Medina-Sierra² ; Mario Fernando Cerón-Muñoz^{2*}

¹Universidad de Antioquia, Facultad de Ciencias Agrarias, Magister en Ciencias Animales, Grupo de Investigación GAMMA: Agrociencias, Biodiversidad y Territorio. Medellín - Antioquia, Colombia; e-mail: manuela.ortegam@udea.edu.co

²Universidad de Antioquia, Facultad de Ciencias Agrarias, Grupo de Investigación GAMMA: Agrociencias, Biodiversidad y Territorio. Medellín - Antioquia, Colombia; e-mail: marisol.medina@udea.edu.co; mario.ceron@udea.edu.co

*autor de correspondencia: mario.ceron@udea.edu.co

Cómo citar: Ortega-Monsalve, M.; Medina-Sierra, M.; Cerón-Muñoz, M.F. 2025. Relación del carbono orgánico y el nitrógeno total con otras variables del suelo en ganaderías del departamento de Antioquia, Colombia. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 28(2):e2553. <http://doi.org/10.31910/rudca.v28.n2.2025.2553>

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 en Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional

Recibido: marzo 1 de 2024

Aceptado: octubre 23 de 2025

Editado por: Helber Adrián Arévalo Maldonado

RESUMEN

Las relaciones establecidas entre los distintos nutrientes del suelo pueden influir en las condiciones para el crecimiento de las plantas. En este caso, las producciones ganaderas dependen de la biomasa de los pastos para alimentar a los animales. Se determinó la relación del carbono orgánico (CO), el nitrógeno (N) total empleando modelos aditivos generalizados (GAM), por medio de análisis de regresiones y suavizados, en suelos dedicados a la producción bovina de leche, carne y doble propósito. En los modelos se incluyeron nutrientes presentes en el suelo y efectos del ambiente, como la ubicación. Se determinó el ajuste por medio de la Devianza y el R^2 y se realizó un análisis descriptivo de las relaciones entre las variables incluidas en los modelos y sus distribuciones espaciales para cada tipo de producción. El CO se relacionó con variables del suelo, como la densidad aparente (DA), la capacidad de intercambio catiónico (CIC), el pH y el N total. El N total se relacionó con el CO, la arcilla, el potasio y el zinc. Los suelos del Norte y Oriente del departamento, dedicados a la producción de leche, registraron niveles más altos de CO, mientras que el Urabá y Magdalena Medio, dedicados a la producción de carne, registraron valores más bajos. Para el N total, el Norte y el Oriente presentaron valores menores que las demás regiones. Las relaciones carbono/nitrógeno (C/N) encontradas para las producciones no presentaron una relación lineal; los valores de dichas relaciones dependen del contenido de N total del suelo.

Palabras clave: Modelos aditivos generalizados; Producción bovina; Relación carbono-nitrógeno; Sistemas sostenibles; Suelos tropicales.

ABSTRACT

The relationships among different nutrients in the soil can influence conditions for plant growth. In this case, livestock production depends on the biomass produced by pastures to feed the animals. The relationship between organic carbon (CO) and total nitrogen (N) was determined using generalized additive models (GAM) through regression analysis and smoothing in soils destined for dairy, meat, and dual-purpose bovine production. Nutrients present in the soil and environmental effects, such as location, were included in the models. The adjustment was determined using Deviance and R^2 and a descriptive analysis of the relationships between the variables included in the models and their spatial distributions for each type of production was conducted. CO was related to soil variables such as apparent density (AD), cation exchange capacity (CEC), pH, and total N. Total N was associated with CO, clay, potassium, and zinc. The soils in the North and East of the department, dedicated to milk production, show higher CO levels, while Urabá and Magdalena Medio, dedicated to meat production, presented low values. For total N, the North and East had lower values compared to the other regions. The carbon/nitrogen (C/N) ratios found for the productions did not show a linear relationship; the values of these relationships depend on the total N content of the soil.

Keywords: Bovine production; Carbon-nitrogen relationship; Generalized additive models; Sustainable systems; Tropical soils.

INTRODUCCIÓN

El suelo es un sistema dinámico en el que se producen diversas interacciones entre la microbiota y los nutrientes. En este contexto, la presencia de carbono orgánico (CO) y nitrógeno total (N total) constituye un factor clave para el desarrollo y la productividad de las plantas (Xue & An, 2018), ya que, al interactuar con otros nutrientes, crea un entorno propicio para su crecimiento cuando se encuentran en cantidades óptimas. Además, su presencia influye en la salud del suelo al mejorar sus propiedades físicas, químicas y biológicas (Purwanto & Alam, 2020).

La relación C/N representa la calidad del sustrato orgánico del suelo y la tasa de N disponible para las plantas. Altos valores indican una descomposición lenta de la MO, ya que los microorganismos inmovilizan el N, mientras que valores entre 10 y 14 indican una rápida descomposición y aprovechamiento de la MO (Gamarra *et al.* 2018).

En el crecimiento de las plantas, es importante que las relaciones entre los nutrientes estén en equilibrio. Este proceso se ve afectado cuando algunos nutrientes están en exceso o cuando se forman precipitados o complejos entre varios nutrientes, que impiden su absorción por parte de la planta (Fageria *et al.* 1997; Fageria, 2006). Específicamente, en los sistemas ganaderos del departamento de Antioquia, se presenta un deterioro de los suelos, debido a la pérdida de la biodiversidad y a la degradación de los recursos naturales (MADR, 1999), lo que conlleva a una disminución de los nutrientes y a una nutrición poco eficaz para las pasturas. Debido a lo anterior, es importante conocer las características del suelo en cada una de las producciones bovinas para evitar desequilibrios nutricionales y alteraciones en la estructura y cambios biológicos, procurando mantener las condiciones edáficas óptimas (Jiménez-Heredia *et al.* 2010).

Por otro lado, la distribución espacial de los nutrientes puede reflejar el estado actual de los suelos del departamento en las producciones bovinas, las cuales se caracterizan por extraer grandes cantidades de nutrientes para satisfacer los requerimientos nutricionales de los pastos. Conocer cómo se distribuyen el carbono orgánico (CO) y el N total en el suelo constituye también un instrumento útil para la toma de decisiones en el manejo del pastoreo en producciones ganaderas, ya que, a partir de la gestión de la carga animal y del aporte de excretas, es posible modificar las concentraciones de CO y N en los suelos (Vendramini *et al.* 2014).

El conocimiento sobre la distribución y gestión de estos nutrientes permite conservar y recuperar su contenido en el suelo, lo que constituye un paso importante para mitigar el cambio climático (Purwanto & Alam, 2020). El suelo y las pasturas bien gestionados aumentan las reservas de CO en los sistemas ganaderos (Braz *et al.* 2013). Zhou *et al.* (2023) concluyen que conocer el contenido y la variación de minerales en el suelo puede promover prácticas de mitigación y de manejo del suelo, que contribuyan a mejorar el secuestro de CO en el suelo. Además, el conocimiento sobre la relación y la distribución de los nutrientes en suelos ganaderos

permite adoptar estrategias de intensificación sostenible ajustando la carga animal, según las condiciones del suelo, cuantificando las dosis de enmiendas necesarias y modificando el tiempo de pastoreo de los animales (Da Silva-Cardoso *et al.* 2020).

Por lo tanto, el objetivo de esta investigación es conocer la relación entre el carbono orgánico y el nitrógeno total con otras variables del suelo en ganaderías del departamento de Antioquia, Colombia.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio. El muestreo se realizó en el departamento de Antioquia, Colombia, en las subregiones Norte, Oriente, Suroeste, Occidente, Nordeste, Urabá, Magdalena Medio, Bajo Cauca y Valle de Aburrá, en fincas dedicadas al cultivo de pastos para ganado de carne, leche y doble propósito. Se recolectaron datos de longitud y latitud de cada uno de los lugares de muestreo para ubicarlos, posteriormente, en los mapas de calor.

Datos químicos del suelo. Se realizaron análisis de química húmeda en las muestras de suelo para determinar la cantidad de nutrientes en cada punto de muestreo. Estos datos fueron necesarios para ejecutar los modelos estadísticos y determinar las relaciones entre las variables de interés con los demás nutrientes del suelo y la ubicación de los sitios de muestreo.

Modelos para determinar la relación entre los nutrientes. Se establecieron diferentes relaciones para las variables CO y N total en las tres producciones, incluyendo todas las combinaciones posibles entre las variables químicas de pH, CO, K, capacidad de intercambio catiónico (CIC), Zn, N y Mn, las variables físicas de densidad aparente y porcentaje de arcilla y la ubicación geográfica (latitud y longitud). Se utilizaron modelos aditivos generalizados (GAM), con distribuciones Gaussiana y de Poisson. Los criterios de evaluación para seleccionar el mejor modelo fueron la Devianza y el R^2 . Adicionalmente, se analizó la relación C/N de cada agrocadena. Se utilizó el software estadístico R-Project (R core Team, 2020) y la librería *mgcv* (Wood, 2017) para la ejecución de los modelos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Carbono orgánico. En la tabla 1, se presentan los modelos seleccionados para cada una de las producciones bovinas. Estos modelos se destacaron por su excelente ajuste a los datos. Se pueden identificar las variables que más impactaron en la concentración del CO y es evidente que el N total se encontró presente en los tres modelos, lo que indica una fuerte relación entre ellos. Autores, como Leghari *et al.* (2016) y Mahmood *et al.* (2017), aseguran que estos nutrientes están estrechamente relacionados con la productividad, la infiltración del agua y la capacidad del suelo, así como con el desarrollo de la estructura y el crecimiento de las pasturas.

Relación entre el carbono orgánico y otros nutrientes en suelos dedicados a la ganadería de leche. Las producciones de leche de Antioquia se concentran principalmente en las zonas Norte (Zapata-Salas *et al.* 2024), Oriente y Suroeste (UPRA, 2020). En

la Figura 1 se observa que, en las regiones donde las temperaturas ambientales son más bajas, existe una mayor concentración de CO en el suelo. En contraste, en el Urabá y el Magdalena Medio, donde las temperaturas son más elevadas, los valores de CO son menores.

Autores como Huamán-Carrión *et al.* (2021) encontraron que la cantidad de CO en suelos de clima frío, caracterizados por una mayor cobertura vegetal y una menor radiación solar, se puede acumular con mayor facilidad.

Tabla 1. Valores de Devianza y R2 para los modelos aditivos generalizados (GAM) de la variable carbono orgánico (CO) en agro cadenas de leche, carne y doble propósito del departamento de Antioquia.

Parámetro	Agrocadena	Modelo	Dev	R ²	Muestras
CO	Leche	$\mu + s(Lon_i, Lat_j) + s(N_k) + s(DA_i) + \epsilon_{ijklm}$	0,89	0,86	665
	Carne	$\mu + s(Lon_i, Lat_j) + s(N_k) + s(CIC_i) + \epsilon_{ijklm}$	0,89	0,88	590
	Doble Propósito	$\mu + s(Lon_i, Lat_j) + s(N_k) + s(pHi) + \epsilon_{ijklm}$	0,90	0,88	109

Dev = devianza, R2=Coeficiente de determinación.

Según el ICA (1992), los contenidos de CO en suelos de clima frío superan el 10 %. Otro factor influyente en los valores de CO en estas zonas es el tipo de pasturas, donde los más comunes en las producciones lecheras son el kikuyo y el ryegrass. Estos pastos se caracterizan por poseer sistemas radicales profundos y presentar altos porcentajes de defoliación, lo que favorece un mayor almacenamiento de CO (Humphreys *et al.* 2003; Kell, 2011). Pérez *et al.* (2019) encontraron en un estudio realizado en la región del Norte, que las raíces del pasto kikuyo son la parte de la planta que tarda más tiempo en descomponerse e incorporan CO al suelo durante, aproximadamente, 12,2 años.

Las relaciones C/N se deben analizar dependiendo de las características climáticas de la zona, ya que en las zonas estudiadas en esta investigación, las producciones de leche se encuentran distribuidas en diferentes climas, lo que puede afectar la interpretación de dicha relación.

En cuanto a la relación entre el CO y la DA del suelo, los resultados concuerdan con los descritos por Leifeld *et al.* (2005), quienes indicaron que la DA del suelo es inversamente proporcional al contenido de CO. Los suelos ricos en materia orgánica (MO) tienden a ser más porosos y químicamente activos, lo que contribuye a reducir su DA (Athira *et al.* 2019); sin embargo, prácticas de manejo, como una alta carga animal pueden generar el efecto contrario en la relación entre el CO y la DA (Martínez *et al.* 2008). Los suelos más densos reducen el aire del suelo, lo que disminuye la actividad de los microorganismos que participan en los procesos de descomposición (Monsalve *et al.* 2017).

Relación del carbono orgánico con otros nutrientes en suelos dedicados a la ganadería de carne. En la figura 1, se observa que los predios se concentran en numerosas subregiones, principalmente en el Suroeste, Nordeste, Occidente, Magdalena Medio, Bajo Cauca y Urabá. Las zonas con altas temperaturas ambientales presentan niveles bajos de CO. Según Casas & Cruzate (2021), el contenido

de CO disminuye a valores promedio de 3,2 % cuando los suelos se exponen a producciones ganaderas extensivas de más de 20 años. Lavelle (1997) afirmó que, en climas cálidos, como lo es la zona del Magdalena Medio, hay gran variedad de fauna en el suelo, que favorece la descomposición de la MO y, por ende, del CO del suelo.

Dado que la mayoría de los suelos destinados a la producción de carne se ubican en zonas de clima cálido, los contenidos de CO en el suelo son moderados, debido a la rápida descomposición, lo que provoca una rápida liberación y aprovechamiento de nutrientes y, en consecuencia, bajas relaciones C/N (ICA, 1992).

Abbona *et al.* (2016) identificaron impactos más pronunciados en la extracción de nutrientes en las explotaciones de ganado de carne, atribuyéndolos a la falta de programas de fertilización adecuados. Según Silveira & Kohmann (2020), Hagedorn *et al.* (2010), Harrison *et al.* (2008) y Neff & Hooper (2002) las altas temperaturas aceleran la descomposición de la MO, debido a que la mineralización del CO es sensible a los cambios de temperatura.

La relación obtenida entre la cantidad de CO y el contenido de CIC del suelo se debe a que la presencia de CO aumenta la concentración de CIC, en la que se reservan nutrientes y aniones de bajo peso molecular (Soares & Ferracciú Alleoni, 2008).

Relación del carbono orgánico con otros nutrientes en suelos dedicados a la ganadería de doble propósito. Con relación a las producciones de doble propósito, se observa una menor cantidad de fincas en comparación con las agro cadenas de carne y leche. Hay una presencia más significativa de esta producción en las regiones del Bajo Cauca, Occidente, Suroeste y Magdalena Medio (Figura 1). Regiones como el Suroeste y el Oriente presentan mayores niveles de CO. Esto se puede atribuir a la presencia de una carga animal adecuada y a la adición de materia orgánica (MO) proveniente de las heces de los animales, lo que favorece el reciclaje de nutrientes. Según Da Silveira Nicoloso *et al.* (2008) y Terra Lopes *et al.* (2008),

los suelos con mayores contenidos de CO suelen ser los andisoles, los cuales, representan el 13,3 % de los suelos del departamento (IGAC, 2007; Jaramillo, 2009). Estos suelos prevalecen en climas fríos y favorecen la acumulación de dicho componente, debido a la formación de complejos estables con materiales inorgánicos

que dificultan su descomposición. Por otro lado, suelos, como los aridisoles, encontrados en zonas áridas y con temperaturas cálidas, tienden a acumular cantidades más reducidas de CO (Jaramillo, 2002).

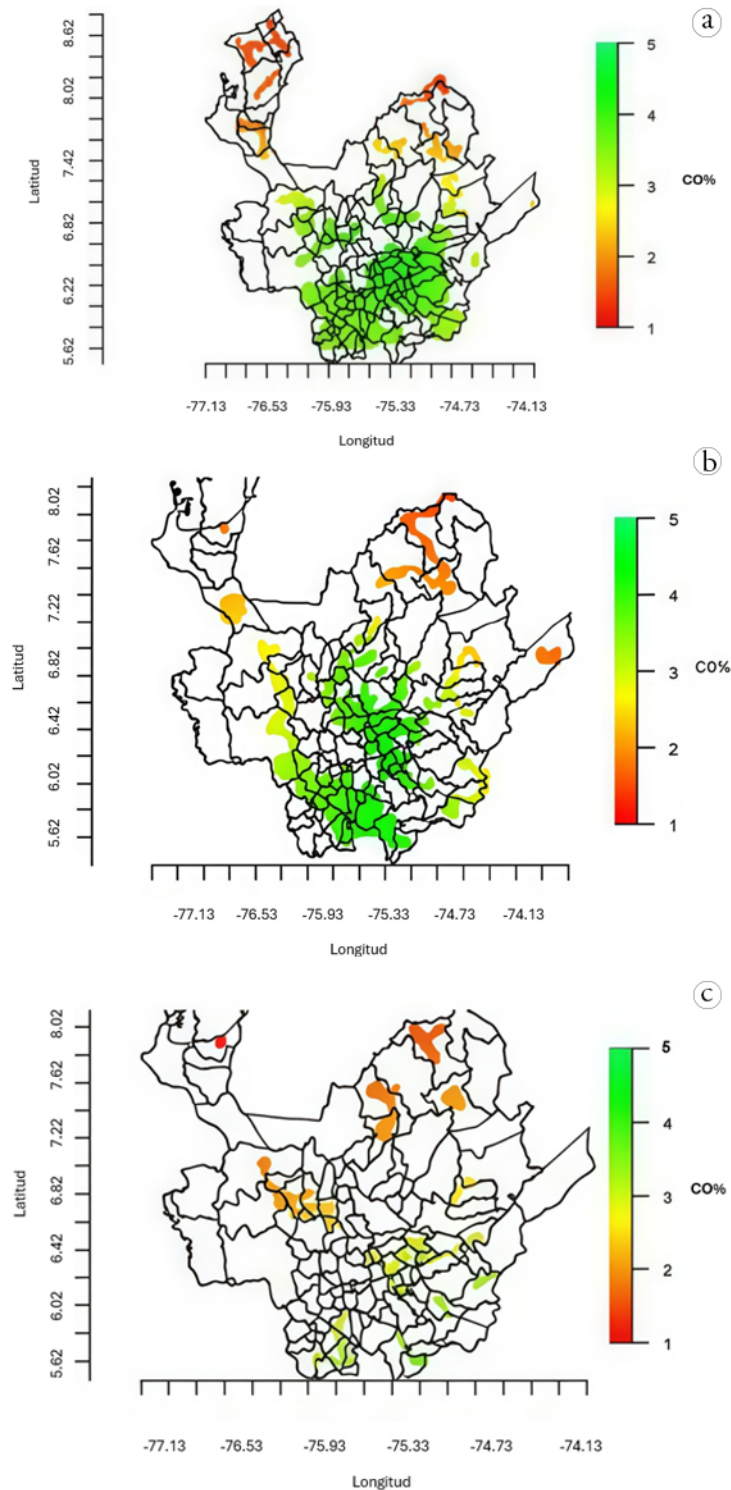


Figura 1. Distribución espacial del carbono orgánico en suelos dedicados a diferentes tipo de producción bovina: a) producción de leche, b) producción de carne, c) producción doble propósito.

Respecto a la relación entre el CO y el pH, Aciego Pietri & Brookes (2008) observaron que la cantidad de CO en el suelo alcanzaba su punto máximo cuando el pH del suelo se situaba en un rango de 5 a 6. Esto se debe a que dicho pH favorece la actividad microbiana y, en consecuencia, la acumulación de CO en el suelo. Por otra parte, se considera que los rangos de pH ideales para el cultivo de pasturas, como las *Urochloas*, comúnmente empleadas en sistemas de doble propósito, se sitúan entre 4,8 y 5,5, según las recomendaciones del ICA (1992).

Nitrógeno total. En la tabla 2, se presentan los modelos estadísticos seleccionados para cada una de las categorías de producción bovina con relación al contenido de N total en el suelo. Estos modelos se destacaron por su excelente ajuste a los datos. Al analizar los modelos de cada agrocadena, se mostró que el CO y la Arcilla (Ar) fueron las variables que más se relacionaron en la concentración de este nutriente en los diferentes modelos.

Tabla 2. Valores de Devianza y R2 para los modelos aditivos generalizados (GAM) de la variable nitrógeno (N) total en agrocadenas de leche, carne y doble propósito del departamento de Antioquia.

Parámetro	Agrocadena	Modelo	Dev	R ²	Muestras
N total	Leche	$\mu + s (Loni, Lat_i) + s (CO_k) + s (K_i, Zn_{m,i}) + s (Ar_n) + \epsilon_{ijklmno}$	0,91	0,90	665
	Carne	$\mu + s (Loni, Lat_i) + s (CO_k) + s (Ar_n) + \epsilon_{ijklm}$	0,90	0,89	590
	Doble Propósito	$\mu + s (Loni, Lat_i) + s (CO_k) + \epsilon_{ijkl}$	0,93	0,92	109

Relación del nitrógeno total con otros nutrientes en suelos dedicados a la ganadería de leche. En cuanto a la distribución del N total en las zonas productoras de leche del departamento, en la figura 2 se observan valores entre 0,2 y 0,6 %, siendo las subregiones del Norte, Oriente y Valle de Aburrá las que registraron los niveles más bajos; sin embargo, estos se consideran adecuados, según el ICA (1992).

Valle de Aburrá y Norte presentaron los valores más bajos de N total (< 2 %) (Figura 2).

En general, las relaciones C/N obtenidas se consideran, ya que la mayoría de los predios se ubican en zonas de trópico bajo, donde la temperatura favorece una mayor descomposición y mineralización de los nutrientes y componentes del suelo.

Entre el N total y la Ar del suelo existe una relación estable. Esto se debe a que en suelos más finos las tasas de mineralización del N son más bajas, debido a la capacidad de la Ar para proteger los compuestos de la MO de la descomposición (Voltr *et al.* 2021; Castellano *et al.* 2012). Las fracciones de Ar en el suelo desempeñan un papel importante en la conservación de los nutrientes del suelo, lo que puede limitar el proceso de secuestro de CO en suelos que albergan mayores cantidades de residuos orgánicos (Soussana & Lemaire, 2014). Cuando los valores de Ar aumentan en el suelo, suele ocurrir una degradación física y cambios en la velocidad de infiltración del agua, lo que genera una disminución de su fertilidad (Jiménez-Heredia *et al.* 2010).

Las relaciones entre el N total, el CO y la Ar son similares a las observadas en los suelos de las producciones lecheras. Soinne *et al.* (2021) reportan que existe una estrecha relación entre estas tres características en suelos con altos contenidos de arcilla, lo que genera un efecto protector sobre el N. Por su parte, Matus *et al.* (2000) señalan que la relación C/N está estrechamente vinculada con las partículas de Ar presentes en el CO.

Relación del nitrógeno total con otros nutrientes en suelos dedicados a la ganadería de carne. En los valores estimados de N total se observó que únicamente las zonas del Urabá, el Magdalena Medio y algunos municipios del Suroeste registraron valores superiores al 0,4 %. En contraste, las subregiones del Oriente,

Relación del nitrógeno total con otros nutrientes en suelos dedicados a la ganadería de doble propósito. En cuanto al contenido de N total, se observó que las cantidades más bajas se registran en las zonas Oriente, Norte y Valle de Aburrá, lo que concuerda con los hallazgos de los modelos anteriores. En la mayoría de los suelos del departamento destinados a esta producción, predominan los valores de N total entre 0,2 y 0,4 % (Figura 2). En el modelo correspondiente a esta agrocadena, la variable más relacionada con la cantidad de N total fue el CO.

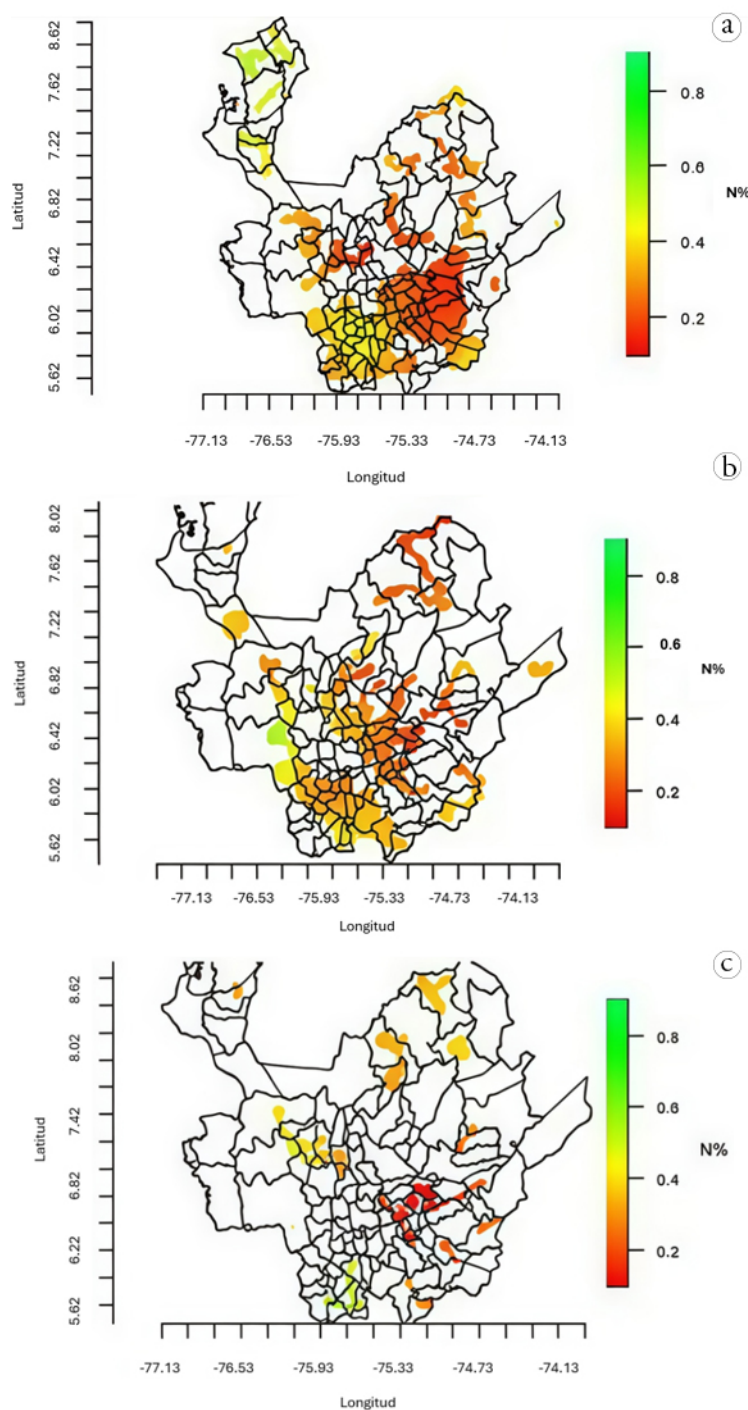


Figura 2. Distribución espacial del nitrógeno total en suelos dedicados a diferentes tipos de producción bovina: a) producción de leche, b) producción de carne, c) producción doble propósito.

Agradecimientos. Los autores agradecen al proyecto CEDAIT de la Universidad de Antioquia, por facilitar las bases de datos empleadas en esta investigación y a todas las personas involucradas en el desarrollo del trabajo. **Financiación:** A la Fundación Universidad de Antioquia por la financiación del proyecto “Diseño y validación de modelos predictivos para determinar la capacidad de intercambio catiónico, el carbono orgánico y el nitrógeno en suelos a partir de imágenes hiperespectrales”, a través del Convenio 2022-7204. **Conflictos de intereses:** el manuscrito fue preparado

y revisado por todos los autores, quienes declaran que no existe ningún conflicto de intereses que comprometa la validez de los resultados. **Contribución de los autores:** Manuela Ortega Monsalve: investigación, metodología, escritura borrador original, validación y visualización. Marisol Medina Sierra: administración de proyectos, supervisión, redacción, revisión y edición. Mario Fernando Cerón: software, metodología, curación de datos supervisión.

REFERENCIAS

- ABBONA, E.; PRESUTTI, M.; VÁZQUEZ, M.; SARANDÓN, S.J. 2016. Los sistemas de producción de leche y carne bovina en la provincia de Buenos Aires ¿Conservan los nutrientes del suelo? *Revista de la Facultad de Agronomía*. 115(2):251-263.
- ACIEGO PIETRI, J.; BROOKES, P.C. 2008. Relationships between soil pH and microbial properties in a UK arable soil. *Soil Biology and Biochemistry*. 40(7):1856-1861. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.03.020>
- ATHIRA, M.; JAGADEESWARAN, R.; KUMARAPERUMAL, R. 2019. Influence of soil organic matter on bulk density in Coimbatore soils. *International Journal of Chemical Studies*. 7(3):3520-3523.
- BRAZ, S.P.; URQUIAGA, S.; ALVES, B.J.R.; JANTALIA, C.P.; GUIMARÃES, A.P.; SANTOS, C.A.; SANTOS, S.C.; PINHEIRO, E.F.M.; BODDEY, R.M. 2013. Soil carbon stocks under productive and degraded *Brachiaria* pastures in the Brazilian Cerrado. *Soil Science Society of America Journal*. 77:914-928. <https://doi.org/10.2136/sssaj2012.0269>
- CASAS, R.R.; CRUZATE, G.A. 2021 ¿Agricultura con reposición de nutrientes o minería de suelos? *Ciencias Exactas, Naturales, Experimentales y de la Salud*. 4(8). <http://doi.org/10.34073/267>
- CASTELLANO, M.J.; KAYE, J.P.; HYSCHMIDT, J.P. 2012. Linking carbon saturation concepts to nitrogen saturation and retention. *Ecosystems*. 15(2):175-187. <http://doi.org/10.1007/s10021-011-9501-3>
- DA SILVA-CARDOSO, A.; BARBERO, R.P.; ROMANZINI, E.P.; TEOBALDO, R.W.; ONGARATTO, F.; FERNANDES, M.H.M.D.R.; RUGGIERI, A.C.; REIS, R.A. 2020. Intensification: A key strategy to achieve great animal and environmental beef cattle production sustainability in *Brachiaria* grasslands. *Sustainability*. 12(16):6656. <https://doi.org/10.3390/su12166656>
- DA SILVEIRA NICOLOSO, R.; LOVATO, T.; AMADO, T.J.C.; BAYER, C.; LANZANOVA, M.E. 2008. Balanço do carbono orgânico no solo sob integração lavoura-pecuária no Sul do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 32(6):2425-2433. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000600020>
- FAGERIA, N.K.; VIRUPAX, C.B.; CHARLES, A.J. 2006. Growth and mineral nutrition of field crops. CRC Press, Taylor & Francis Group. 551p.
- FAGERIA, V.D. 1997. Nutrient interactions in crop plants. *Journal of Plant Nutrition*. 24(8):1269-1290. <https://doi.org/10.1081/PLN-100106981>
- GAMARRA, C.C.; DÍAZ, M.I.; VERA DE ORTÍZ, M.; GALEANO, M.D.P.; CABRERA A.J.N. 2018. Relación carbono-nitrógeno en suelos de sistemas silvopastoriles del Chaco paraguayo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. 9(46):4-26. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i46.134>
- HAGEDORN, F.; MARTIN, M.; RIXEN, C.; RUSCH, S.; BEBI, P.; ZURCHER, A.; SIEGWOLF, R.T.W.; WIPE, S.; ESCAPE, C.; ROY, J.; HATTENSCHWILER, S. 2010. Short-term responses of ecosystem carbon fluxes to experimental soil warming at the Swiss alpine treeline. *Biogeochemistry*. 97:7-19. <https://doi.org/10.1007/s10533-009-9297-9>
- HARRISON, A.F.; TAYLOR, K.; SCOTT, A.; POSKITT, J.; BENHAM, D.; GRACE, J.; CHAPLOW, J.; ROWLAND, P. 2008. Potential effects of climate change on DOC release from three different soil types on the Northern Pennines UK: examination using field manipulation experiments. *Global Change Biology*. 14(3):687-702. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01504.x>
- HUAMÁN-CARRIÓN, M.L.; ESPINOZA-MONTES, F.; BARRIAL-LUJAN, A.I.; PONCE-ATENCIO, Y. 2021. Influencia de la altitud y características del suelo en la capacidad de almacenamiento de carbono orgánico de pastos naturales altoandinos. *Scientia Agropecuaria*. 12(1):83-90. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2021.010>
- HUMPHREYS, M.W.; CANTER, P.J.; THOMAS, H.M. 2003. Advances in introgression technologies for precision breeding within the *Lolium Festuca* complex. *Annals of applied biology*. 143(1):1-10. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2003.tb00263.x>
- INSTITUTO COLOMBIANO AGROPECUARIO, ICA. 1992. Fertilización en diversos cultivos. 5ª. aproximación. Manual de asistencia técnica No. 25. ICA. Bogotá. Disponible desde Internet en: <https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/14124>.
- INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI, IGAC. 2007. Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras. Departamento de Antioquia. IGAC, Bogotá. Disponible en: <https://metadatos.icde.gov.co/geonetwork/srv/api/records/14138633>.
- JARAMILLO D.F. 2009. Variabilidad espacial de las propiedades ándicas de un Andisol hidromórfico del Oriente Antioqueño (Colombia). *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*. 62(1):4907-4921.
- JARAMILLO, D.F. 2002. Introducción a la ciencia del suelo. Universidad Nacional de Colombia. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. (Colombia). Tomado. 619p.

- JIMÉNEZ-HEREDIA, Y.; MARTÍNEZ-BRAVO, C.M.; MANCERA-RODRÍGUEZ, N.J. 2010. Características físicas y químicas del suelo en diferentes sistemas de uso y manejo en el Centro agropecuario Cotové, Santa Fé de Antioquia. Colombia. Revista de Suelos Ecuatoriales. 40:176-188.
- KELL, D.B. 2011. Breeding crop plants with deep roots: their role in sustainable carbon, nutrient, and water sequestration. *Annals of Botany*. (United States). 108(3):407-418. <https://doi.org/10.1093/aob/mcr175>.
- LAVELLE, P. 1997. Faunal activities and soil processes: adaptative strategies that determine ecosystem function. *Advances in Ecological Research*. 27:93-132. [https://doi.org/10.1016/S0065-2504\(08\)60007-0](https://doi.org/10.1016/S0065-2504(08)60007-0)
- LEGHARI, S.J.; WAHOCHO, N.A.; LAGHARI, G.M.; HAFEEZLAGHARI, A.; MUSTAFABHABHAN, G.; HUSSAINTALPUR, K.; BHUTTO, T.A.; WAHOCHO, S.A.; LASHARI, A.A. 2016. Role of nitrogen for plant growth and development: A review. *Adv. Environment and Biology*. 10(9):209-219.
- LEIFELD, J.; BASSIN, S.; FUHRER, J. 2005. Carbon stocks in Swiss agricultural soils predicted by land-use, soil characteristics, and altitude. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 105(1-2):255-66. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2004.03.006>
- MAHMOOD, F.; KHAN, I.; ASHRAF, U.; SHAHZAD, T.; HUSSAIN, S.; SHAHID, M.; ABID, M.; ULLAH, S. 2017. Effects of organic and inorganic manures on maize and their residual impact on soil physico-chemical properties. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 17(1):22-32.
- MARTÍNEZ, E.; FUENTES, J.P.; ACEVEDO, E. 2008. Carbono orgánico y propiedades del suelo. Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal. 8(1):68-96. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-27912008000100006>
- MATUS, F.J.; MAIRE, G.; CHRISTIAN, R. 2000. Interaction between soil organic matter, soil texture and the mineralization rates of carbon and nitrogen. *Agricultura Técnica*. 60(2):112-126. <https://doi.org/10.4067/S0365-28072000000200003>
- MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL, MADR. 1999. Anuario Estadístico. Sistemas Editoriales, Santa Fe de Bogotá. (Colombia).
- MONSALVE C., O.I.; GUTIÉRREZ-D., J.S.; CARDONA, W.A. 2017. Factores que intervienen en el proceso de mineralización de nitrógeno cuando son aplicadas enmiendas orgánicas al suelo. Una revisión. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*. 11(1):200-209. <https://doi.org/10.17584/rcch.2017v11i1.5663>
- NEFF, J.C.; HOOPER, D.U. 2002. Vegetation and climate controls on potential CO₂, DOC and DON production in northern latitude soils. *Global Changing Biology*. 8(9):872-884. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2002.00517.x>
- 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>
- PURWANTO, B.H.; ALAM, S. 2020. Impact of intensive agricultural management on carbon and nitrogen dynamics in the humid tropics. *Soil Science and Plant Nutrition*. 66(1):50-59. <https://doi.org/10.1080/00380768.2019.1705182>
- R CORE TEAM. 2020. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>
- REPÚBLICA DE COLOMBIA. UNIDAD DE PLANIFICACIÓN RURAL AGROPECUARIA, UPRA. 2020. Plan de ordenamiento productivo Cadena Láctea. Análisis situacional Bogotá D.C., Colombia. Disponible desde Internet en: https://www.andi.com.co/uploads/20200430_dt_analsitlechelarga_andreagonzalez.pdf.
- SILVEIRA, M.L.; KOHMANN, M.M. 2020. Maintaining soil fertility and health for sustainable pastures. In *Management strategies for sustainable cattle production in southern pastures*. 35-58. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814474-9.00003-7>
- SOARES, M.R.; FERRACCIÚ ALLEONI, L.R. 2008. Contribution of soil organic carbon to the ion exchange capacity of tropical soils. *Journal of Sustainable Agriculture*. 32(3):439-462. <https://doi.org/10.1080/10440040802257348>
- SOINNE, H.; KESKINEN, R.; RÄTY, M.; KANERVA, S.; TURTOLA, E.; KASEVA J.; SALO T. 2021. Soil organic carbon and clay content as deciding factors for net nitrogen mineralization and cereal yields in boreal mineral soils. *European Journal of Soil Science*. 72(4):1497-1512. <https://doi.org/10.1111/ejss.13003>
- 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>
- TERRA LOPES, M.L.; DE FACCIO CARVALHO, T.; ANGHINONI, P.C.; DOS SANTOS, I.; KUSS, D.T.; DE FREITAS, F.F.; CASSOL FLORES, J.P.C. 2008. Sistema de integração lavoura-pecuária: desempenho

- e qualidade da carcaça de novilhos superprecoces terminados em pastagem de aveia e azevém manejada sob diferentes alturas. *Ciência Rural*. 38(1):178-184. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782008000100029>
- VENDRAMINI, J.M.; DUBEUX, J.R.; SILVEIRA, M.L. 2014. Nutrient cycling in tropical pasture ecosystems. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*. 9(2): 308-315. <https://doi.org/10.5039/agraria.v9i2a3730>
- VOLTR, V.; MENŠÍK, L.; HLISNIKOVSKÝ, L.; HRUŠKA, M.; POKORNÝ, E.; POSPÍŠILOVÁ, L. 2021. The soil organic matter in connection with soil properties and soil inputs. *Agronomy*. 11(4):779. <https://doi.org/10.3390/agronomy11040779>
- WOOD, S.N. 2017. Generalized additive models: An introduction with R. Segunda edición. Chapman and Hall/CRC. 496p. <https://doi.org/10.1201/9781315370279>
- XUE, Z.; AN, S. 2018. Changes in soil organic carbon and total nitrogen at a small watershed scale as the result of land use conversion on the loess plateau. *Sustainability*. 10(12):4757. <https://doi.org/10.3390/su10124757>
- ZAPATA-SALAS, R.; GUARÍN-MONTOYA, J.F.; RÍOS-OSORIO, L.A. 2024. Caracterización de sistemas de producción lechera y salud de la ubre en el norte de Antioquia, Colombia. *Agroecosistemas tropicales y subtropicales*. 27(3). <http://doi.org/10.56369/tsaes.4791>
- ZHOU, Y.; BOMFIM, B.; BOND, W.J.; BOUTTON, T.W.; CASE, M.F.; COETSEE, C.; STAYER, A.C. 2023. Soil carbon in tropical savannas mostly derived from grasses. *Nature Geoscience*. 16(8):710-716. <https://doi.org/10.1038/s41561-023-01232-0>