

Almacenamiento de carbono en suelos bajo pasturas de sistemas productivos lecheros altoandinos

D. A. Abril-Herrera^{1*} , J. R. Mora-Delgado²  y G. L. Martínez-Restrepo² 

Recibido: 27/11/2022. Aprobado: 23/03/2023

RESUMEN

Las diferentes prácticas agropecuarias sobre el suelo afectan la capacidad de captura y almacenamiento de carbono orgánico (CO), provocando emisiones de gases efecto invernadero (GEI) que influyen en el cambio climático. El objetivo de esta investigación fue evaluar el almacenamiento de carbono en suelos de 16 sistemas ganaderos del municipio de Guatavita, departamento de Cundinamarca, Colombia. Se definieron cuatro grupos: 1. Sistemas de Producción con Tecnología Moderna (SPTM), 2. Sistemas de Mediana Productividad (SPMP), 3. Sistemas Tradicionales (SPT) y 4. Sistemas Ecoamigables (SPEA), de acuerdo con el tipo de oferta ambiental y las tecnologías utilizadas en mencionados sistemas. Se determinó el almacenamiento de carbono mediante cálculo de porcentaje de carbono orgánico (% CO) utilizando el método Walkley & Black, densidad aparente (DA) a través de terrón parafinado y profundidad de muestra del suelo tomada con barreno helicoidal. Los resultados mostraron diferencias estadísticas ($p > 0,05$) para las variables % CO y DA entre algunos grupos, pero no para almacenamiento de carbono. Se encontró que el grupo 4 presentó un almacenamiento de 179,18 toneladas de carbono/hectárea (tC/ha); seguido del grupo 2, con 170,48 tC/ha; grupo 1, con 137 tC/ha; y grupo 3, con 135,07 tC/ha. Los valores de DA de todos los sistemas oscilaron entre medios y altos; a pesar de esta condición, y su relación con el contenido de CO, se concluye que los sistemas ganaderos de Guatavita son amplios fijadores de carbono atmosférico en los suelos y contribuyen a mitigar los efectos nocivos causantes del cambio climático global.

Palabras clave: ganadería, cambio climático, almacenamiento, gases efecto invernadero.

Carbon storage in soils used for pasture in high-andean dairy production systems

ABSTRACT

The different agricultural practices on the soil affect its capacity to capture and store organic carbon (CO), causing greenhouse gas (GHG) emissions that influence climate change. The aim of this research was to evaluate carbon storage in soils of 16 livestock systems in the municipality of Guatavita, department of Cundinamarca, Colombia. Four groups were defined: 1. Systems with Modern Technology (ES: SPTM), 2. Medium Productivity Systems (ES: SPMP), 3. Traditional Systems (ES: SPT), and 4. Eco-friendly

¹ Universidad de Cundinamarca. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Programa de Zootecnia. Grupo de Investigación SISPROS. Dg 18 N.º 20-29. Fusagasugá. Colombia.

² Universidad del Tolima. Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia. Grupo de Investigación Sistemas Agroforestales Pecuarios. Calle 42 N.º 1-02. Ibagué. Colombia.

* Autor de correspondencia. Correo electrónico: adiego@ucundinamarca.edu.co

systems (ES: SPEA), according to the type of environmental supply and technologies used in the above-mentioned systems. We determined the carbon storage by calculating the percentage of organic carbon (% CO) using the Walkley & Black method; by evaluating the bulk density (ES: DA) through a paraffinized clod and the depth of the soil sample taken with a helicoidal auger. The results showed statistical differences ($p > 0.05$) for the variables % CO and DA between some groups, but not for carbon storage. We found that group 4 presented a storage of 179.18 tons of carbon/hectare (tC/ha), followed by group 2 with 170.48 tC/ha, group 1 with 137 tC/ha, and group 3 with 135.07 tC/ha. The DA values of all the systems ranged from medium to high despite this condition and its relationship with the CO content; it is concluded that Guatavita livestock systems are ample fixers of atmospheric carbon in soils and contribute to mitigating the harmful effects of global climate change.

*ES: conventions with Spanish abbreviations.

Keywords: livestock, climate change, storage, greenhouse gases (GHG).

INTRODUCCIÓN

El carbono (C) es el pilar de la vida en la Tierra. En nuestro planeta, existen cuatro reservorios en los que este se acumula, los cuales contienen diversas y amplias cantidades: la atmósfera, la superficie terrestre, los océanos y las rocas sedimentarias, con aproximadamente 700, 2.000, 38.000 y 1.200.000 gigatoneladas (Gt) de carbono respectivamente (Ruiz Méndez *et al.* 2018). El C está presente en la atmósfera en forma de CO_2 , en la hidrosfera, se encuentra como bicarbonato y como ion carbonato y, en la litosfera, como carbón mineral, rocas carbonatadas y/o petróleo. Las plantas, a través de la fotosíntesis, incorporan a sus tejidos el CO_2 disponible en la atmósfera e hidrosfera; la cadena trófica terrestre y marina permite a las especies consumidoras alimentarse de material vegetal, lo que permite al C formar parte de su organismo y, a su vez, retornarlo a la atmósfera a través de la respiración o al subsuelo a través de las excretas o, posterior a su muerte y descomposición, formando rocas carbonatadas (Arana, citado por Latriglia y Vera 2015).

Gases como el CO_2 , óxido de nitrógeno (N_2O), metano (CH_4), vapor de agua, entre

otros, son considerados de efecto invernadero (GEI) y son causantes, desde hace varios años, del calentamiento y cambio climático a nivel global (Del Prado 2020). Su liberación se atribuye a diversas actividades humanas como la deforestación y la intervención de los suelos para la implementación de sistemas agropecuarios y el desarrollo de las zonas urbanas, así como a la búsqueda y el uso de combustibles fósiles para generar energía. Según Rojas García *et al.* (2017), las acciones antropogénicas pueden alterar el ciclo del C, el ciclo del agua y/o el ciclo de nutrientes, lo que a su vez afecta la dinámica de los diversos ecosistemas terrestres que dependen de estas interacciones biológicas y procesos naturales. Se estima que cerca del 25% de las emisiones de CO_2 son generadas por la agricultura (deforestación, labranza, quemas) y la presión constante que el hombre ejerce sobre el suelo con las diversas especies animales a nivel productivo (Rodríguez 2016).

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2014) reporta que las emisiones de GEI provenientes de la agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra incrementaron 8% entre 2000 y 2010 en relación con la

década de los noventa, pasando de 7,5 Gt a 8,1 Gt de CO₂ eq., y sigue en aumento.

Generalmente, se asocia el cambio climático con las interacciones que suceden de manera exclusiva en la atmósfera, pero es muy importante considerar que el proceso de fotosíntesis que llevan a cabo las plantas utiliza carbono atmosférico, con lo que se logra estabilizar o incorporar una cantidad en los suelos hasta por periodos amplios de tiempo (cientos de años) (Burbano Orjuela 2018); existen organismos fotosintéticos más eficientes que otros, lo cual depende de la velocidad de captura de las moléculas de CO₂ y su posterior transformación en carbohidratos necesarios para formar biomasa. Las plantas han alcanzado amplias evoluciones para asegurar y optimizar el flujo de CO₂ (Almeraya del Valle y Sánchez Quintanar 2015). Así, el suelo, además de cumplir funciones clave para el sostenimiento de la vida, desempeña otras muy importantes e irremplazables en el ciclo del C de nuestro planeta (Dimas y Gnacadja 2009). Teniendo en cuenta lo anterior, se puede afirmar que el suelo contribuye a mitigar los efectos nocivos atmosféricos que genera el CO₂ (Burbano Orjuela 2018). A su vez, Rattan (1994) señala que el suelo cuenta con características de textura, agregación, distribución y tamaño de poros que influyen de manera importante en la emisión y almacenamiento de C.

La FAO reporta que los niveles de CO₂ disponibles en la atmósfera pueden ser reducidos con la disminución de emisiones o almacenándolo en reservas terrestres y ecosistemas acuáticos (FAO s. f.). A su vez, indica que existe un gran potencial para incrementar el contenido de C en la biomasa de las plantas y en suelos degradados mediante la implementación de modelos adecuados de labranza y la adopción de prácticas que contribuyan a

su conservación, convirtiendo la degradación de las tierras por deforestación en respuestas económicas beneficiosas, mayor biodiversidad agrícola, mejora de la conservación y gestión ambiental y el incremento del secuestro de C.

Teniendo en cuenta las condiciones de manejo de los suelos, su importancia como organismo vivo, mitigante de cambio climático y la necesidad de información que aporte a la mejora de los sistemas ganaderos del país, el objetivo de la presente investigación fue cuantificar el contenido de carbono orgánico del suelo con el fin de calcular el almacenamiento de carbono asociado a cuatro tipos de sistemas de producción presentes en la zona altoandina del departamento de Cundinamarca, Colombia.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La investigación se realizó en 16 sistemas bovinos situados a una altura promedio de 2.690 metros sobre el nivel del mar (m. s. n. m), con temperatura aproximada de 14 °C y una precipitación de 1.300 mm/año (Barrios y Gómez 2009), dedicados a la producción de leche a pequeña y mediana escala, distribuidos en seis veredas del municipio de Guatavita, ubicado en la Provincia del Guavio, noroccidente del departamento de Cundinamarca, Colombia. El municipio cuenta con una extensión de 252,27 km² de los cuales 246 km² corresponden al área rural. La ganadería de leche es la principal actividad económica del municipio, que es pionero a nivel departamental en cooperativismo y asociatividad lechera (Alcaldía Municipal de Guatavita 2019). Para 2020, se reportó un total de 10.724 cabezas de ganado

distribuidas en 974 predios (MinAgricultura 2020). A nivel general, las pasturas predominantes corresponden a las especies Kikuyo (*Cenchrus clandestinus* Hochst. ex Chiov Morrone) y Raigrass (*Lolium* spp.).

Selección de sistemas productivos

La selección de los predios se basó en la tipificación, previamente realizada, por el proyecto de investigación “Productividad y eficiencia de la energía en diferentes tipos de sistemas de producción lecheros altoandinos de Colombia”, financiado por la Universidad del Tolima, para lo cual se determinaron cinco variables: producción de leche (kg/animal), área de pasturas (Ha), unidades animales, topografía (plana, ondulada, ladera) y precipitación (mm/año) y dos índices (tecnología moderna y tecnología ecoamigable) que permitieron seleccionar las fincas acordes con el propósito de dicha investigación. Se aplicó

una encuesta estructurada a los productores identificados en la que se recopiló información específica relacionada con el área productiva, las pasturas, el número y tipo de animales, las prácticas de manejo de los suelos, entre otros. Se realizó un análisis de conglomerados obteniendo cuatro (4) tipos representativos según los sistemas de producción. Para cada conglomerado, se identificaron las fincas centrómero. La extracción de las fincas centrómero se llevó a cabo utilizando el algoritmo de clasificación *K-means*, que realizó los respectivos agrupamientos minimizando la suma de distancias entre cada objeto y el centroide, basado en sus características. Se eligieron diez fincas de cada grupo caracterizado y se analizaron las primeras cuatro fincas más cercanas al centrómero (tabla 1). En la tabla 2 se comparte la localización geográfica de los sistemas analizados.

TABLA 1. Parámetros de agrupamiento de los sistemas productivos objeto de estudio

Grupo	Oferta ambiental	Tecnologías
1	Favorable (suelos fértiles, balance hídrico apropiado, topografía plana, alta productividad primaria).	Alta mecanización del suelo, ordeño mecánico, rotación de pasturas, fertilización de síntesis química apropiada.
2	No favorable (suelos con mediana a baja fertilidad, balance hídrico irregular, topografía ondulada y pendiente, baja productividad primaria).	Mecanización del suelo, ordeño mecánico, poca rotación de pasturas, alta fertilización de síntesis química.
3	No favorable (suelos con mediana a baja fertilidad, balance hídrico irregular, topografía ondulada y pendiente, baja productividad primaria).	Baja mecanización del suelo, ordeño manual, poca rotación de pasturas, baja fertilización de síntesis química.
4	No favorable (suelos con mediana a baja fertilidad, balance hídrico irregular, topografía ondulada y pendiente, baja productividad primaria).	Baja mecanización, ordeño mecánico, rotación de pasturas, baja fertilización de síntesis química, reciclaje de nutrientes con fertilización orgánica.

Grupo 1: Sistemas de Producción con Tecnología Moderna (SPTM); Grupo 2: Sistemas de Producción de Mediana Productividad (SPMP); Grupo 3: Sistemas de Producción Tradicionales (SPT); Grupo 4: Sistemas de Producción Ecoamigables (SPEA).

Fuente: elaboración propia.

TABLA 2. Localización de los sistemas analizados

Grupo	Nombre del predio/finca	Vereda	Ubicación
1	Los Tunos	Corales	04°53'28.8"N; 073°48'00.4"W
	Ojo de Agua	Corales	04°53'45.8"N; 073°48'14.5"W
	Los Colorados	Corales	04°53'03.8"N; 073°48'58.7"W
	Las Mercedes	Guandita	04°54'59.20"N; 073°48'25.95"W
2	El Guabal	La Concepción	04°49'19.0"N; 073°45'57.9"W
	San Luis	La Concepción	04°51'2.88"N 073°46'44.27"W
	Santa Lucía	La Concepción	04°48'49.5"N; 073°46'27.2"W
	San Marcos	Juiquín	04°49'51.0"N; 073°45'57.1"W
3	El Ganso	Carbonera Alta	04°57'00,3"N; 073°46'12,9"W
	El Rosal	Carbonera Baja	04°57'05.3"N; 073°46'57.1"W
	San Pedro	Carbonera Baja	04°56'38,4"N; 073°47'38,2"W
	Santa Susana	Carbonera Baja	04°55'56.5"N; 073°50'10,9"W
4	Tolomita	Guandita	04°54'31.4"N; 073°47'05.4"W
	El Arrayán	Guandita	04°54'59.2"N; 073°47'11.5"W
	La Planada	Guandita	04°54'31.40"N 073°49'5.40"W
	La Esmeralda	Corales	04°53'09.7"N; 073°48'36.2"W

Grupo 1: Sistemas de Producción con Tecnología Moderna (SPTM); Grupo 2: Sistemas de Producción de Mediana Productividad (SPMP); Grupo 3: Sistemas de Producción Tradicionales (SPT); Grupo 4: Sistemas de Producción Ecoamigables (SPEA).

Fuente: elaboración propia.

Muestreo de suelos

En cada sistema productivo, se tomaron 15 submuestras de suelo distribuidas al azar utilizando un barreno helicoidal, a una profundidad de 0 a 30 cm, que luego fueron homogenizadas para obtener una muestra compuesta de aproximadamente 250 gramos (g). Las dieciséis muestras se empacaron en bolsas plásticas oscuras no reutilizadas, recubiertas con bolsas plásticas de cierre hermético, rotuladas y almacenadas para transporte al Laboratorio de Suelos de la Universidad de Cundinamarca, Sede Fusagasugá, Colombia.

Estimación de Carbono Orgánico (CO) en el suelo

Para determinar el porcentaje de carbono orgánico (% CO), las muestras fueron dispuestas en crisoles de porcelana, los cuales se alojaron en un desecador por 48 horas con el propósito de garantizar su adecuado secado, además, para su posterior análisis, se pasaron por un tamiz de 2 milímetros (mm). El método Walkley & Black, descrito por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) (2006), se aplicó por triplicado en cada muestra de suelo. Esto consiste en la oxidación del carbono incorporando dicromato de potasio (K₂Cr₂O₇) y ácido sulfúrico concentrado (H₂SO₄). Adicionalmente, se utilizó la ecuación 1, adaptada por

Granados (2020) (datos no publicados), para calcular los porcentajes de carbono orgánico en las muestras obtenidas de los sistemas productivos objeto de estudio.

Ecuación 1

Cálculo porcentaje de carbono orgánico en suelos.

$$\% CO = \frac{(VFeSO_4 - B) * NFeSO_4}{W_m} * 0,003 * Fd$$

Donde:

% CO: porcentaje de carbono orgánico.
 VFeSO₄: volumen (mL) de sulfato ferroso gastado en las muestras de suelos.

B: volumen del sulfato ferroso gastado en el blanco.

NFeSO₄: normalidad del sulfato ferroso = 0,9986.

0,003: peso miliequivalente del carbono en gramos.

W_m: peso de la muestra en gramos.

Fd: factor de dilución: 100.

Con base en los porcentajes promedio de CO obtenidos, se utilizó como referencia la clasificación de suelos en función del clima y valores de CO (tabla 3) descrita por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) (2011), con el fin de determinar si los suelos de los sistemas productivos evaluados se consideraban con bajo, mediano o alto contenido de CO.

TABLA 3. Clasificación de suelos en función del clima y valores de CO

Elemento	Clima del sistema evaluado			Concepto
	Frío	Medio	Cálido	
	< 2,90	< 1,74	< 1,16	Bajo contenido de CO
% CO	2,90-5,80	1,74-2,90	1,16-2,32	Mediano contenido de CO
	> 5,80	> 2,90	> 2,32	Alto contenido de CO

Fuente: IGAC 2011.

Densidad aparente del suelo

Se aplicó por triplicado la técnica de terrón parafinado, descrita por el IGAC (2006), para calcular la densidad aparente (DA) de los suelos objeto de estudio, expresada en gramos sobre centímetro cúbico (g.cm⁻³). Los valores obtenidos se compararon con la tabla de clasificación de densidad aparente en suelos (tabla 4) desarrollada por Cairo (1995) y citada por Castillo (2005).

TABLA 4. Clasificación de DA en suelos

Densidad aparente (g.cm ⁻³)	Clasificación
< 1,0	Muy baja
1,0 – 1,2	Baja
1,2 – 1,45	Media
1,45 – 1,6	Alta
>1,6	Muy alta

Fuente: Cairo 1995; Castillo 2005.

Almacenamiento de carbono

Para determinar el almacenamiento de CO, se utilizó el procedimiento descrito por Andrade *et al.* (2003), el cual toma en cuenta valores de densidad aparente, carbono orgánico y profundidad del suelo:

Ecuación 2

Cálculo para determinar el almacenamiento de C en suelos.

$$COS(tC. ha^{-1}) = DA * \% CO * Ps(cm)$$

Donde:

COS: almacenamiento de carbono (tC.ha⁻¹).

DA: densidad aparente (g.cm⁻³).

% CO: porcentaje de carbono orgánico.

Ps: profundidad del muestreo en suelo (cm).

Análisis estadístico

En el análisis de resultados, se aplicó el modelo General Linear Model (GLM) con el fin de evaluar carbono orgánico, almacenamiento de carbono y densidad aparente, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$Y_{ij} = \mu + \theta_i + \epsilon_{ij}$$

Donde:

Y_{ij}: son las variables respuesta o dependientes (densidad aparente, porcentaje de carbono orgánico, almacenamiento de carbono).

μ: es la media poblacional.

θ_i: corresponde al tipo de sistema productivo.

ε_{ij}: es el error experimental relacionado con las réplicas.

Se realizó análisis de varianza (ANOVA) en una vía para determinar diferencias estadísticas entre los grupos. De igual forma, se realizaron pruebas de comparación múltiple de medias de Tukey. Asimismo, se efectuó análisis de correlación para observar posible asociación entre % CO, DA y almacenamiento de C, dichos análisis fueron desarrollados con STATGRAPHICS Centurion XVIII e InfoStat (2020 versión I).

Resultados y discusión

Porcentaje de carbono orgánico (% CO)

Los dieciséis sistemas productivos evaluados presentaron rangos en los resultados de CO que van desde 2,19% hasta 7,22%. De acuerdo con los valores de clasificación de suelos del IGAC (2011), presentados en la tabla 5, once sistemas productivos mostraron un mediano contenido de CO; tres sistemas productivos tuvieron un bajo contenido de CO y dos últimos sistemas evidenciaron un alto contenido de CO.

TABLA 5. Clasificación de los suelos con base en el contenido de CO y DA

Grupo	Sistema productivo	Clasificación CO	Clasificación DA
1	Los Tunos	Mediano contenido	Media
	Ojo de Agua	Mediano contenido	Muy alta
	Los Colorados	Bajo contenido	Media
	Las Mercedes	Bajo contenido	Media
2	El Guabal	Mediano contenido	Media
	San Luis	Mediano contenido	Alta
	Santa Lucía	Mediano contenido	Media
	San Marcos	Alto contenido	Media
3	El Ganso	Bajo contenido	Muy baja
	El Rosal	Mediano contenido	Muy alta
	San Pedro	Mediano contenido	Alta
	Santa Susana	Mediano contenido	Muy alta
4	Tolomita	Mediano contenido	Media
	El Arrayán	Mediano contenido	Muy alta
	La Planada	Alto contenido	Media
	La Esmeralda	Mediano contenido	Media

Fuente: elaboración propia.

En relación con los grupos 1 y 3, no se encontró diferencia estadística significativa ($p > 0,050$). Por el contrario, el análisis estadístico permitió evidenciar diferencias significativas ($p < 0,010$) entre los grupos 2 y 3. También se detectaron diferencias entre los grupos 3 y 4. En esta investigación no se encontraron diferencias estadísticas significativas ($p > 0,050$) entre los grupos 1, 2 y 4 (figura 1).

Varios autores reportan valores similares a los obtenidos en esta investigación. Otero *et al.* (2011) reportaron, en su trabajo realizado en el municipio de Puracé, departamento del Cauca, Colombia, a 3.260 m s. n. m., contenidos de CO del 6,2% en suelos dedicados a la agricultura y ganadería con especies vegetales predominantes para pastoreo *P. clandestinum* y *Holcus lanatus*. En el municipio de Pasca, Cundinamarca (Colombia), Rodríguez (2014) realizó un estudio similar en condiciones agroclimáticas

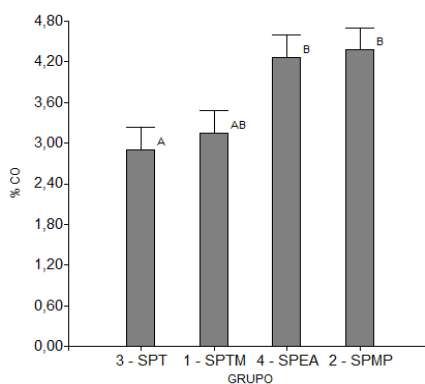


FIGURA 1. Comportamiento del % CO del suelo en los grupos de sistemas productivos bovinos del municipio de Guatavita.

Letras en común no representan diferencias estadísticas significativas ($p > 0,050$); SPTM: Sistemas de Producción con Tecnología Moderna; SPMP: Sistemas de Producción de Mediana Productividad; SPT: Sistemas de Producción Tradicionales; SPEA: Sistemas de Producción Ecoamigables.

Fuente: elaboración propia.

al municipio de Guatavita, el contenido de CO en suelos con *P. clandestinum* y *S. nigra* L, con resultados de valor promedio de 11,76%. Este mismo estudio indica que el aumento de CO es influenciado por el tipo de vegetación que se encuentra como cobertura vegetal, debido a que este aporta restos orgánicos, los cuales son mineralizados y humificados fácilmente. Una tercera investigación, realizada por Carvajal *et al.* (2009) en paisajes andinos con menor altitud del municipio de Alcalá (región cafetera colombiana), evidenció un 5,75% de CO en muestras de suelo obtenidas a 20-30 cm de profundidad. Por otro lado, Andrade *et al.* (2016) determinaron la concentración de CO en pasturas con manejo orgánico en el municipio de Piedras, departamento del Tolima, a una altitud de 403 m s. n. m., donde se encontraron valores de 1,8%, menores a los obtenidos en el presente estudio. Lo anterior reafirma lo mencionado por Valenzuela y Visconti (2018), quienes señalan que el clima y los usos de suelo tienen amplio efecto sobre la dinámica del COS y, por consiguiente, los suelos de clima frío cuentan con mayor contenido, por lo que resaltan en su trabajo que los suelos bajo pasturas suelen presentar mayor contenido de CO que suelos dedicados a cultivos intensivos de ciclo corto. Alvarado *et al.* (2013) reportaron que el COS puede ser un indicador indirecto de la calidad física y biológica de los suelos, pues está directamente relacionado con la materia orgánica existente, ya que esta contiene entre el 55% y el 60% de carbono total. Además, la agregación y la estabilidad de los suelos depende directamente de la materia orgánica porque aumenta la porosidad, lo cual ayuda a la infiltración y el incremento de nutrientes disponibles para las plantas (FAO 2002).

En relación con la similitud estadística entre los grupos 1 y 3, se resalta que, a pesar de las condiciones de oferta ambiental y uso o implementación de tecnologías descritas en la tabla 1, factores importantes como la topografía (plana u ondulada), alta o baja mecanización del suelo y la adecuada o baja rotación de pasturas que realizan ambos sistemas no generaron diferencias significativas en este estudio, pero sí presentaron los valores más bajos para esta variable. Las diferencias entre los grupos 2 y 3 se pueden ser atribuir a la alta tasa de aplicación de enmiendas y fertilizantes químicos sobre el suelo que se realizan en el grupo 2. La FAO (2002) señala que estas prácticas incrementan la biomasa aérea y del suelo, por lo que se espera que el COS sea generalmente incrementado. Las diferencias entre los grupos 3 y 4 podrían ser influenciadas por el manejo y reciclaje de nutrientes con fertilización orgánica, lo cual también incrementa el contenido de materia orgánica en este último sistema.

Densidad aparente (DA)

Con respecto a la DA de estos suelos, se encontró que el promedio general fue de 1,42 g.cm⁻³. Santa Susana fue el sistema productivo que obtuvo mayor valor, con 1,87 g.cm⁻³, caso contrario a El Ganso, que presentó un promedio de 0,95 g.cm⁻³. En cuanto a los grupos, los valores promedio evidenciaron diferencias estadísticas significativas ($p < 0,010$) entre el número 2 y 3. Sin embargo, es importante considerar que, de acuerdo con la tabla de clasificación citada por Castillo (2005), los sistemas que integran el grupo 2 se encuentran en rangos de media a alta densidad. En el grupo 3, por el contrario, se encontró la mayor DA de los grupos. En esta investigación, los grupos 1 y 4 no demostraron diferencias significativas entre

sí ($p > 0,050$) al considerar que, según las variables de clasificación (oferta ambiental y uso o implementación de tecnologías), presentan condiciones y prácticas de manejo diferentes sobre los suelos que no infringieron sobre esta característica (figura 2).

Los resultados de DA coinciden con lo reportado por Noguera et al. (2011), quienes evaluaron en su investigación la DA sobre cinco tratamientos en suelos con *P. clandestinum*, el cual obtuvo el valor más alto (1,17 g.cm⁻³) frente a un bosque secundario y tres sistemas silvopastoriles de *S. pistacifolia*, *D. integrifolium* y *E. glóbulos*, donde el rango varió desde 0,46 hasta 0,76 g.cm⁻³. Se evidenció que el sistema silvopastoril aumenta la porosidad de los suelos, caso contrario al monocultivo, los cuales se compactan, disminuyen su aireación y penetración de las raíces, lo cual sustenta que los suelos desprotegidos (sin cobertura vegetal) pueden llegar a

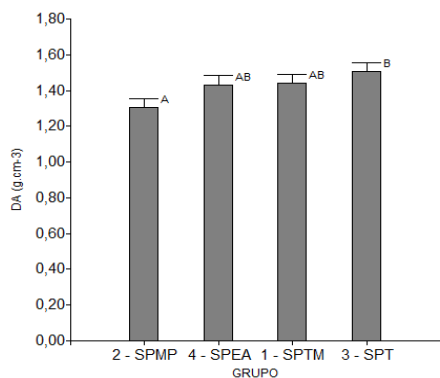


FIGURA 2. Valores de DA (g.cm⁻³) del suelo en los grupos de sistemas productivos bovinos del municipio de Guatavita.

Letras en común no representan diferencias estadísticas significativas ($p > 0,050$); SPTM: Sistemas de Producción con Tecnología Moderna; SPMP: Sistemas de Producción de Mediana Productividad; SPT: Sistemas de Producción Tradicionales; SPEA: Sistemas de Producción Ecoamigables.

Fuente: elaboración propia.

aumentar la densidad a niveles mayores de 1,0 g.cm⁻³. Por su lado, Siavosh et al. (2000) realizaron un estudio donde compararon la DA de suelo en los Andes de Colombia mediante cinco tratamientos: T1 guadales y bosques, cafetales tradicionales, ganadería extensiva, ganadería intensiva de leche y T5 ganadería extensiva de producción de carne, y encontraron que los dos primeros variaron entre 0,69 y 0,82 g.cm⁻³. Para el caso de las ganaderías, la densidad presentó un rango entre 0,98 hasta 1,10 g.cm⁻³. En cuanto a los grupos, los valores promedio evidenciaron diferencias estadísticas significativas ($p < 0,010$) entre 2 y 3. La menor DA del grupo 2 estaría asociada al mayor contenido de MO que este presenta (González, Iglesias y Herrera 2009) en relación con los demás grupos. Lo anterior se puede corroborar comparando las figuras 1 y 2. Sin embargo, es importante considerar que, de acuerdo con la tabla de clasificación citada por Castillo (2005), los sistemas productivos del grupo 2 se encuentran en rangos de media a alta densidad. En el grupo 3, por el contrario, se encontró la mayor DA de los grupos, asociada posiblemente a la inadecuada rotación de pasturas que incrementa el pisoteo de los animales, así como a factores naturales asociados a la textura, estructura y humedad del suelo (González, Iglesias y Herrera 2009) que comprometen su porosidad. En esta investigación, los grupos 1 y 4 no demostraron diferencias significativas entre sí ($p > 0,050$) al considerar que, según las variables de clasificación (oferta ambiental y uso o implementación de tecnologías), estos presentan condiciones y prácticas de manejo diferentes de los suelos que no infringieron sobre esta característica. Lo anterior permite deducir que la compactación ocasionada por el movimiento,

peso o sobrecarga animal genera valores de alta densidad independientemente de las prácticas positivas o negativas que se realicen sobre estos suelos.

Almacenamiento de CO en el suelo

El almacenamiento de CO en los suelos tuvo alta variabilidad entre sistemas con rangos de 62,33 a 283 tC/ha, donde San Marcos fue el sistema productivo que obtuvo mayor valor. Sin embargo, estadísticamente, no se presentaron diferencias significativas entre grupos ($p > 0,050$). El grupo 4 obtuvo el rango de mayor captura de C con un promedio de (179,18 tC/ha). Además, es relevante considerar que en los demás grupos también se presentó una amplia captura de C en relación con las medias y altas DA presentadas: 170,48, 137 y 135,07 tC/ha para los grupos 2, 1 y 3, respectivamente (figura 3).

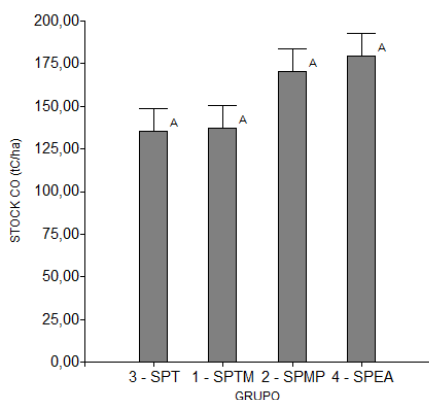


FIGURA 3. Comportamiento del stock de carbono del suelo en los grupos de sistemas productivos bovinos del municipio de Guatavita.

Letras en común no representan diferencias estadísticas significativas ($p > 0,050$); SPTM: Sistemas de Producción con Tecnología Moderna; SPMP: Sistemas de Producción de Mediana Productividad; SPT: Sistemas de Producción Tradicionales; SPEA: Sistemas de Producción Ecoamigables.

Fuente: elaboración propia.

Sobre el mayor almacenamiento de C, que se presentó en el grupo 4, se destaca que, a pesar de los altos valores de DA de las fincas de este grupo, el almacenamiento de C en el suelo puede ser influenciado por el manejo, el reciclaje de nutrientes con fertilización orgánica y uso de suplementos endógenos, lo cual incrementa y/o mantiene los contenidos de materia orgánica. Los datos obtenidos coinciden con el trabajo publicado por Bustamante y Esparraga (2015), quienes evaluaron la capacidad de captura de carbono del suelo en un sistema ganadero a campo abierto con presencia de forrajes *Lolium perenne*, *Poa pratensis* y *Trifolium repens*, ubicado a 2.221 m s. n. m. en Pomacochas, Perú. Los resultados evidenciaron que dicho sistema tenía almacenadas 78,85 tC/ha en los primeros 0 a 20 cm de suelo, con tendencia a disminuir en función de la profundidad con valores de 49,61 tC/ha entre 20 y 40 cm y 31,85 tC/ha entre 40 y 60 cm, respectivamente. Un segundo trabajo, publicado por Martínez, Bravo y Martín (2014), se desarrolló en dos parcelas de suelos con pasturas no especificadas dedicadas a la alimentación de animales, ubicadas entre los 2.850 y 3.238 m s. n. m., en la subcuenca del río Las Piedras en el departamento del Cauca, Colombia. En este se evidenció un valor promedio de 65 tC/ha almacenadas en los primeros 0 a 10 cm de profundidad. Por su parte, Rojas, Andrade y Segura (2018) encontraron que, en el municipio de Santa Isabel, Tolima, Colombia, en sistemas de pasturas con árboles dispersos ubicados a una altura promedio de 2.400 m s. n. m., la captura de C correspondió a 79,8 tC/ha. Ibrahim *et al.* (2006) quienes realizaron un estudio en los departamentos del Valle del Cauca y Quindío, Colombia, al determinar el CO en pastura degradada y

pastura mejorada (*Brachiaria*) sin árboles, reportaron valores de 68,51 y 81,32 tC/ha, respectivamente. Este estudio evidencia que el mejoramiento de las pasturas puede ayudar a capturar el CO₂, al mostrar que las producciones ganaderas pueden aportar con el almacenamiento de este elemento y a la mitigación del cambio climático.

Análisis de correlación

La matriz de correlación multivariada permitió analizar la relación que existe entre el % CO, la DA y el almacenamiento de C, como lo muestra la tabla 6. Allí se observó que el % CO y el almacenamiento de CO presentaron una correlación positiva ($Z=0,89$) altamente significativa ($p < 0,010$). A su vez el % CO estuvo asociado inversamente con la DA ($Z=-0,11$) (tabla 6).

TABLA 6. Prueba de correlación por rangos de Pearson para las variables evaluadas

	% CO	DA	Stock CO
% CO	1		
DA	-0,11	1	
Stock CO	0,89**	0,34	1

% CO: porcentaje de carbono orgánico; DA: densidad aparente (g.cm^{-3}); Stock CO: *stock* de carbono orgánico en suelo (tC/ha); **: valores altamente significativos ($p < 0,010$).

Fuente: elaboración propia.

La correlación negativa presentada entre el % CO y DA de la matriz de Pearson explica y corrobora que, a medida que aumenta la compactación de los suelos, disminuye el % CO. Lo anterior coincide con el estudio de Alvarado *et al.* (2013), quienes especifican que la incorporación de materia orgánica mejora las propiedades fisicoquímicas y biológicas de los suelos por medio de la descomposición que realizan

los microorganismos que existen en el área edáfica. Por su parte, la correlación entre DA y el almacenamiento de CO en esta investigación fue positiva, de manera similar al trabajo de Andrade *et al.* (2016), quienes reportaron que, en pasturas de trópico bajo, la DA aumentó con el incremento del almacenamiento de CO, lo que generó, a su vez, una controversia con los resultados de Andrade *et al.* (2014), quienes en su trabajo presentaron tendencia inversa en pasturas de clima frío, aclarando que puede deberse a la ausencia de reestructuración de macro agregados del suelo.

Conclusiones

En los grupos se encontraron diferencias estadísticas para la DA del suelo con mayores valores en los sistemas del grupo 3 y menores en los sistemas del grupo 2, sin embargo, es importante considerar que los valores de esta variable oscilaron entre medios y altos para todos.

Los valores medios a altos de DA encontrados en la mayoría de sistemas productivos permiten constatar que, a pesar de la inclusión de diferentes prácticas, en especial positivas para el suelo, la continua presencia de animales y maquinaria sobre las pasturas genera y mantiene compactación sobre este, valores que podrían disminuir con la implementación de árboles dispersos en potreros que aumenten la porosidad, aireación del suelo y, por ende, el COS, junto a la mejora de los modelos de rotación de pasturas, labranza mínima y la mayor incorporación de MO al suelo.

A pesar de la correlación inversa entre la DA y el % CO, en este estudio el C almacenado en el suelo fue muy similar a los valores reportados por otros autores, lo que resalta el potencial de los sistemas ganaderos del municipio de Guatavita, Cundinamarca, como mitigadores de

cambio climático, ya que estos pueden actuar como sumideros importantes de CO del suelo y son susceptibles de más estudios que permitan mejorar las prácticas sobre el suelo y la participación de los predios en los programas de bonos de C.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés.

Reconocimientos/fuentes de financiación

Esta investigación fue desarrollada bajo el marco del proyecto “Productividad y eficiencia de la energía en diferentes tipos de sistemas de producción lecheros altoandinos de Colombia”, financiado por la Universidad del Tolima.

Agradecimientos

A la Universidad del Tolima y a la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia por la financiación; a la Universidad de Cundinamarca y al equipo de laboratoristas por la valiosa colaboración; a los pequeños y medianos productores ganaderos del municipio de Guatavita, Cundinamarca, por su inmensa amabilidad y disposición; al corredor tecnológico de Bogotá y Cundinamarca por la base de datos primaria.

Referencias

- Alcaldía Municipal de Guatavita. 2019. Plan de Desarrollo 2020-2023. Guatavita, Cundinamarca. Disponible en: https://guatavita.101tramites.com/Proyectos/Documentos_Detalles_Proyectos/Plan%20de%20Desarrollo%20Guatavita%202020%20-%202023.pdf
- Almeraya del Valle E y Sánchez Quintanar E. 2015. Adaptaciones fotosintéticas en las plantas para mejorar la captación del carbono. Ciencia. Disponible en: https://amc.edu.mx/revistaciencia/images/revista/66_4/PDF/AdaptacionesFotosinteticas.pdf
- Alvarado JA. 2013. Almacenamiento de carbono orgánico en suelos en sistemas de producción de café (*Coffea arabica* L.) en el municipio del Líbano, Tolima, Colombia. Colombia Forestal. 16(1):21-31. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2013.1.a02>
- Andrade HE. 2014. Impact of grazing on soil organic storage carbon in high lands of Anaimé, Tolima, Colombia. Zootecnia Tropical. 32(1):7-21. Disponible en: http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-72692014000100002&lng=es&nrm=iso
- Andrade-Castañeda HSMP. 2016. Carbono orgánico del suelo en bosques riparios, arrozales y pasturas en Piedras, Tolima, Colombia. Agronomía Mesoamericana. 27(2):233-241. Disponible en: http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1659-13212016000200233&lng=en&nrm=iso
- Ávila E. 2005. Los suelos de Colombia y sus estadísticas más recientes. Biblioteca IDEAM. <http://documentacion.ideam.gov.co/cgi-bin/koha/opac-MARCdetail.pl?biblionumber=29015>
- Barrios C y Gómez J. 2009. Diseño de rutas para el municipio de Guatavita. Bogotá: Universidad de los Andes. Disponible en: <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/16272/u686349.pdf?sequence=1>
- Bear R, Rintoul D, Snyder B, Smith-Caldas M, Herren C y Horne E. 2016. Principles of Biology-Biogeochemical Cycles. In Principles of Biology. Disponible en: <https://archive.org/details/cnx-org-coll11569/page/n7/mode/2up>
- Benito Y. 2016. Fundación San Patricio. Disponible en: <http://programainvestigacion.org/pdf/guias2016-17/Guia%20introdutoria%20al%20tema%20CO%20y%20cambio%20climatico.pdf>
- Burbano Orjuela H. 2018. El carbono orgánico del suelo y su papel frente al cambio climático. Revista de Ciencias Agrícolas. 82-96. <http://dx.doi.org/10.22267/rcia.18350185>
- Bustamante J y Esparraga T. 2015. Evaluación de la influencia del uso de la tierra en el almacenamiento de carbono orgánico en suelos de la microcuenca ganadera de Pomacochas del departamento de Amazonas, Perú. Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de

- Amazonas. Disponible en: <https://repositorio.untrm.edu.pe/handle/20.500.14077/660>
- Campo M, Rincón L, Castaño L, Ayala R y Súa D. 2013. Caracterización económica y empresarial de las provincias de cobertura de la CCB. Disponible en: <https://bibliotecadigital.ccb.org.co/server/api/core/bitstreams/2c93c556-b2c9-4cc3-96f1-aa5389a78ec2/content>
- Carvajal A, Feijoo A, Quintero H y Rondón M. 2009. Carbono orgánico del suelo en diferentes usos del terreno de paisajes andinos colombianos. *Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal*. 7. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-27912009000300005>
- Castillo CM. 2005. Selección y calibración de indicadores locales y técnicos para evaluar la degradación de los suelos laderas, en la microcuenca Cusamá El Tuma-La Dalia Matagalpa. Managua: Universidad Nacional Agraria. Disponible en: <https://repositorio.una.edu.ni/1094/>
- Del Prado A. 2020. La ganadería y su contribución al cambio climático. *Amigos de la Tierra*. Disponible en: <https://helda.helsinki.fi/server/api/core/bitstreams/266ad8bd-25a3-4bf2-8294-c5bb73760ff3/content>
- Dimas S y Gnacadja L. 2009. Cambio climático: ¿el suelo puede cambiar las cosas? Disponible en: <https://circabc.europa.eu/ui/group/54d2e010-4fc4-4962-9113-1e7d574f4a46/library/bd461b84-c2ab-47d5-b2ae-2ca3e833c808>
- FAO. s. f. Portal de Suelos de la FAO. Obtenido de ¿Qué es el Secuestro de Carbono?. Disponible en: <http://www.fao.org/soils-portal/soil-management/secuestro-de-carbono-en-el-suelo/es/>
- FAO. 2002. Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. Informe sobre recursos mundiales de suelos. Disponible en: <http://www.fao.org/3/bl001s/bl001s.pdf>
- FAO. 2014. Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra. Emisiones por fuentes y absorciones por sumideros Análisis 1990-2011. Roma. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-i3671s.pdf>
- González O, Iglesias C y Herrera M. 2009. Análisis de los factores que provocan compactación del suelo agrícola. *Ciencias Técnicas Agropecuarias*. 3-5. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/932/93215937011.pdf>
- Granados J. 2020. Cálculos análisis químicos de suelos. Fusagasugá. Colombia. Universidad de Cundinamarca. [Documento inédito].
- Ibrahim MC. 2006. Almacenamiento de carbono en el suelo y la biomasa arbórea en sistemas de usos de la tierra en paisajes ganaderos de Colombia, Costa Rica y Nicaragua. *Agroforestería en las Américas*. 45:27-36. Disponible en: <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/7934>
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). 2006. Métodos analíticos del laboratorio de suelos (6a ed.). Bogotá: IGAC.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). 2012. Estudio de los conflictos de uso del territorio colombiano (1a ed.). Disponible en: <https://repositorio.agrosavia.co/handle/20.500.12324/12723>
- Jaramillo D. 2002. Introducción a la ciencia del suelo. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/70085/70060838.2002.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Latriglia LX y Vera C. 2015. Captura de carbono en sistemas pastoriles establecidos en Colombia. *Revista de Sistemas de Producción Agroecológicos*. 6(1):89-113. <https://doi.org/10.22579/22484817.666>
- Martínez C, Bravo I y Martín F. 2014. Influencia del cambio de uso de suelo en almacenamiento de carbono de ecosistemas altoandinos. *Suelos Ecuatoriales*. 5. Disponible en: http://unicauca.edu.co/revistas/index.php/suelos_ecuatoriales/article/view/34
- MinAgricultura. 2020. Inventario Pecuario. Bogotá. Disponible en: <https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=65>
- Morocho, V. 2017. Evaluación del contenido de carbono en el suelo de un sistema de pastoreo y bosque nativo de la reserva Huayrapalte, cantón Suscal, provincia de Cañar. Riobamba, Ecuador: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Disponible en: <http://dspace.espace.edu.ec/bitstream/123456789/6659/1/33T0166.pdf>
- Noguera A. 2011. Evaluación de algunas propiedades físicas del suelo en diferentes usos. *Revista de Ciencias Agrícolas*. 28:40-52. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5104116.pdf>
- Oliveira G. 2018. CCUS-Captação, Utilização e Armazenamento Geológico de Dióxido de Carbono. 3ERL-Congress and other Meeting

- Presentations/Apresentações em Congressos e em Outras Reuniões. Lisboa, Portugal. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10284/7871>
- Otero J, Figueroa A, Muñoz F y Peña M. 2011. Loss of soil and nutrients by surface runoff in two agro-ecosystems within an Andean paramo área. *Ecological Engineering*. 2-3. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.08.001>
- Rattan L. 1994. Métodos y normas para evaluar el uso sostenible de los recursos suelo y agua en el trópico. USDA. Disponible en: <https://repositorio.agrosavia.co/handle/20.500.12324/18552>
- Reddy K y Hodges H. 2000. Climate Change y Global Crop Productivity. USA. <https://doi.org/10.1079/9780851994390.0001>
- Rodríguez E. 2014. Cambios en el contenido de carbono orgánico e índice de estabilidad estructural procedentes de varios usos de suelo de sistemas ganaderos y altitudes en la Provincia del Sumapaz. Maestría Ciencias Agrarias. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/52678>
- Rodríguez M. 2016. Stock de carbono del suelo, a escala local, en ocho sistemas de uso agrícola del piedemonte llanero. Palmira, Valle del Cauca, Colombia. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/56121>
- Rojas García F, Santoyo Gómez G, González Montiel E, Velásquez Rodríguez A y Pulido Ponce J. 2017. La ciencia del suelo en el ciclo del carbono de México. Programa Mexicano del Carbono. 1-2. Disponible en http://148.215.1.182/bitstream/handle/20.500.11799/105813/Art%c3%adculo%20La%20Ciencia%20del%20Suelo_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Rojas A, Andrade H y Segura M. 2018. Los suelos del paisaje altoandino de Santa Isabel (Tolima, Colombia) ¿son sumideros de carbono orgánico? *Revista UDCA. Actualidad & Divulgación Científica*. 3. <https://doi.org/10.31910/rudca.v21.n1.2018.662>
- Ruiz Méndez C, Delgado Martín M, Corrochano Fernández D y Asensio M. 2018. Concienciación y capacitación en materia de cambio climático. Disponible en <http://medialab.usal.es/concienciacioncambioclimatico/wp-content/uploads/sites/7/2018/06/Mo%CC%81dulo-3-Texto.pdf>
- Siavosh SR. 2000. Impacto de sistemas de ganadería sobre las características físicas, químicas y biológicas de suelos en los Andes de Colombia. *Agroforestería para la Producción Animal en Latinoamérica*. 77-95. <https://es.scribd.com/document/346954640/Impacto-de-Sistemas-de-Ganaderia-Sobre-Las-Caracteristicas-Fisicas>
- Valenzuela I y Visconti E. 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*. 7. Disponible en: www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2011-21732018000100233

Forma de citación del artículo:

Abril-Herrera, D. A., Mora-Delgado, J. R. y Martínez-Restrepo, G. L. (2023). Almacenamiento de carbono en suelos bajo pasturas de sistemas productivos lecheros altoandinos. *Rev Med Vet Zoot*. 70(3): e106045. <https://doi.org/10.15446/rfmvz.v70n3.106045>