

Prácticas sostenibles para la conservación de suelos en sistemas productivos ganaderos de trópico alto

Sustainable practices for soil conservation in livestock production systems in the highland tropics

Luis G. Bautista-Montealegre*¹

Juan C. Benavides-Cruz¹; William A. Cardona¹; Paola J. Criollo-Campos¹
Daniel R. Torres-Cuesta¹; Luis O. Albarracín-Arias¹; Martha M. Bolaños-Benavides¹

Recibido para publicación: 10 de febrero de 2023 - Aceptado para publicación: 15 de marzo de 2023

RESUMEN

La ganadería bovina en Colombia se lleva a cabo en grandes extensiones, en 2022 se reportaron cerca de 633.841 predios y 29.301.392 animales. Los sistemas tradicionales con baja implementación tecnológica generan un impacto negativo sobre los suelos, afectando sus propiedades físicas y químicas. Por lo tanto, es importante implementar alternativas de manejo que garanticen sostenibilidad y rentabilidad. En este sentido, mediante una alianza entre FAO y AGROSAVIA, se evaluó durante dos periodos de tiempo el efecto de tres sistemas: silvopastoril con arreglo en franjas de pastoreo (SSP), silvopastoril con renovación de praderas (SRP) y tradicional con praderas de pastoreo (ST), sobre las propiedades físicas y químicas del suelo. Se utilizó un diseño experimental de parcelas divididas, se aplicó un análisis de varianza multivariado (MANOVA) de dos vías (sistema productivo y tiempo de muestreo) y un análisis de varianza (ANOVA) con prueba Tukey al 5%. Mediante el software ArcGIS® Pro 2.9.0 (ESRI®), se interpolaron los resultados de los muestreos previamente georreferenciados, utilizando la técnica de distancia inversa ponderada (IDW) e Índice de Moran, para verificar el tipo de distribución de las variables influenciadas por los factores. El MANOVA indicó que los factores individuales incidieron significativamente sobre conductividad eléctrica (CE), Na y P, e interacción de factores sobre Fe, Cu, Mn, densidad real (DR) y retención de humedad (RH). Por su parte, mediante el ANOVA se identificaron diferencias significativas, registrándose mayor CE, P, RH y menor DR en SSP; mayor contenido de Fe y Mn en SRP y Cu en ST.

Palabras clave: Ganadería extensiva, gestión sostenible de suelos, incorporación tecnológica, propiedades físicas y químicas del suelo, sistemas silvopastoriles.

¹Corporación colombiana de investigación agropecuaria-AGROSAVIA. Km 14 vía Bogotá-Mosquera (Cundinamarca)

*Autor para correspondencia: Luis G. Bautista-Montealegre
Email: lbautista@agrosavia.co

ABSTRACT

Livestock in Colombia is carried out in large areas, in 2022 about 633.841 farms and 29.301.392 animals were reported. Traditional systems with low technology generate a negative impact on soils, affecting physical and chemical conditions. Therefore, it is important to implement management alternatives that guarantee sustainability and profitability. Through an alliance between FAO and AGROSAVIA, the effect of the three systems was evaluated during two periods of time: silvopastoral with an arrangement in a strip-grazing pasture (SPS), silvopastoral with grasslands renewal (GRS), and traditional grazing on grasslands (TS), on physical and chemical properties of the soil. A split-plot experimental design was used, a two-way multivariate analysis of variance (two-way MANOVA) was applied (productive system and sampling time), and an analysis of variance (ANOVA) with a 5% Tukey's test. Using the ArcGIS® Pro 2.9.0 (ESRI®) software, the results of the previously georeferenced samplings were interpolated, using the inverse distance weighting technique (IDW) and the Moran's Index, to verify the type of distribution of the variables influenced by the factors. The MANOVA indicated that individual factors had a significant effect on electrical conductivity (EC), Na, and P, and interaction of factors on Fe, Cu, Mn, particle density (PD), and moisture retention (MR). On the other hand, through the ANOVA, significant differences were identified, registering higher EC, P, MR, and lower PD in SPS, higher content of Fe and Mn in GRS and Cu in TS.

Keywords: Extensive Livestock, sustainable soil management, technological incorporation, physical and chemical soil properties, silvopastoral systems.

Cómo citar

Bautista-Montealegre, L. G., Benavides-Cruz, J. C., Cardona, W. A., Criollo-Campos, P.J., Torres-Cuesta, D.R., Albarracín-Arias, L. O. y Bolaños-Benavides, M. M. 2023. Prácticas sostenibles para la conservación de suelos en sistemas productivos ganaderos de trópico alto. *Temas Agrarios* 28(1): 9-22. <https://doi.org/10.21897/rta.v27i2.3169>



Temas Agrarios 2023. Este artículo se distribuye bajo los términos de la Licencia Creative Commons Attribution 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es>), que permite copiar, redistribuir, remezclar, transformar y crear a partir del material, de forma no comercial, dando crédito y licencia de forma adecuada a los autores de la obra.

Temas Agrarios. Enero - Junio 2023; Vol. 28. No. 1 pp. 9 - 22| ISSN 2389-9182 | <https://doi.org/10.21897/rta.v27i2.3169>

INTRODUCCIÓN

La ganadería bovina en Colombia es una actividad realizada en grandes extensiones, para el año 2022 el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) reportó 29.301.392 animales distribuidos en 633.841 Unidades Productivas Agropecuarias (UPAs), concentradas en los departamentos de Boyacá 13,8%, Cundinamarca 12,9%, Antioquia 10,3%, Nariño 7,4%, Santander 6,8%, Córdoba (5,0%), Tolima 3,8%, Cauca (3,3%), Caquetá 3,3% y Meta 3,2%; lo cual representó incremento de 4,7% en el inventario de animales respecto a 2021 (ICA, 2022). En Boyacá existen unidades de lechería especializada ubicadas principalmente en las provincias de Centro, Tundama, Sugamuxi y Occidente; mientras que, las unidades doble propósito y tradicional se distribuyen en todo el departamento (Gobernación de Boyacá, 2018). En cuanto a la producción de leche, se estiman 1.502.352 litros a partir de 26.367 UPAs (González *et al.*, 2020), lo cual refleja la importancia de este sector en la economía agropecuaria de la región y el país.

A pesar de los beneficios socioeconómicos que representa los sistemas productivos pecuarios, diversos autores mencionan impactos negativos de la ganadería extensiva sobre la salud del suelo, especialmente relacionados con la estructura de este a causa de la presión ejercida por los animales al momento de alimentarse y/o movilizarse; la cual se calcula aproximadamente en 9 kg cm⁻² (González *et al.*, 2020) o 138 kPa cuando están estáticos, presión que puede llegar a ser comparada con la ejercida por rodillos de tractores no cargados (74 kPa a 81 kPa) y presiones de tracción de vehículos arrastrados (58 kPa) Medina, 2016. Adicionalmente, la ganadería extensiva genera otro tipo de impactos entre los cuales se encuentran disminución de la

actividad biológica, infiltración, retención de humedad y fertilidad; incremento de erosión eólica, remoción en masa y deslizamientos, entre otros (Murgueitio, 2003, Ibrahim *et al.*, 2006, Fuentes-Hernández *et al.*, 2019).

El pastoreo extensivo es el uso de tierra más utilizado y es representativo en la expansión de la frontera agropecuaria en el país, impactando zonas de importancia ecológica como bosques tropicales, andinos y tropicales secos, humedales y páramos; esto requiere de estrategias de identificación de áreas de pastoreo con restricciones biofísicas según zonas protegidas, pendientes y fertilidad de suelos; así como el planteamiento de tecnologías para la producción intensiva sostenible y sistemas de múltiples estratos y/o sistemas silvopastoriles, que permitan la conservación de recursos y el paisaje (Etter y Zuluaga, 2018).

Los sistemas silvopastoriles (SSP) permiten establecer simultáneamente especies pecuarias domésticas con forestales en una misma área; logrando así la integración de especies leñosas, herbáceas y animales. Para dicha integración, en el estrato inferior se ubican pastos y leguminosas rastreras que representan la principal fuente de alimento para los animales; en el estrato medio se encuentran especies vegetales leñosas sin un tallo principal que se utilizan como fuente de alimento complementaria; mientras que en el estrato superior se establecen árboles de porte medio a alto destinados a fines comerciales, sombrío y/o alimentación humana y animal (Portilla-Pinzón *et al.*, 2015).

Se han documentado múltiples beneficios para las propiedades de los suelos por la inclusión de los SSP en las actividades ganaderas; Ríos *et al.* (2006) reportan la

reducción de 46% en la escorrentía respecto a sistemas tradicionales, principalmente al mejorar la estructura de los perfiles por extensión de raíces de las especies forrajeras y arbustivas establecidas; igualmente, Vallejo *et al.* (2012), mencionan un incremento del porcentaje de macro y mesoporos, menor densidad aparente y resistencia a la penetración; en tanto que, Bueno-López y Camargo-García (2015) indican que la leguminosa arbustiva *Leucaena leucocephala* como componente del sistema, aporta aproximadamente 250 kg ha⁻¹ anuales de N al suelo, lo cual además de presentar beneficios económicos por reducción de uso de fertilizantes nitrogenados, disminuye la huella de carbono (C).

En este contexto, Contreras-Santos *et al.* (2020), revelan que, en promedio, los SSP acumulan de 60,6 t ha⁻¹ a 65,1 t ha⁻¹ de C en comparación con un sistema tradicional, el cual reporta aproximadamente 38,3 t ha⁻¹. Finalmente, a nivel biológico Camero-Rey *et al.* (2014) mencionan que, los SSP contribuyen al incremento de las poblaciones de lombrices al pasar 95 a 315 individuos por m² después de la implementación experimental del sistema, esta cantidad considerada significativamente superior respecto al manejo tradicional 262 lombrices por m², es posiblemente influenciada por el incremento del sombrero, humedad, materia orgánica del suelo y disminución en la temperatura media de este.

Partiendo de las anteriores consideraciones, la presente investigación evaluó el efecto de sistemas de pastoreo sobre propiedades físicas y químicas de suelos destinados a la

producción lechera especializada en el departamento de Boyacá.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La investigación se realizó durante 2022 en una finca ganadera ubicada en el municipio de Saboyá, departamento de Boyacá (Colombia). Según modelos de elevación construidos con información satelital de la NASA (The National Aeronautics and Space Administration), el terreno presenta altitud de 2.784 a 2.808 m y pendientes entre 0% a 36% (Figura 1). Según datos cartográficos y geográficos de IGAC (2022), la zona agroecológica donde se ubica el predio presenta relieve moderado a fuertemente quebrado y moderadamente escarpado, afectados por escurrimiento difuso, erosión laminar ligera y movimientos en masa; asociación de suelos Pachic Fulvudands; Andic Dystrudepts y Humic Dystrudepts, muy profundos a superficiales, limitados por saturaciones de aluminio, bien drenados, texturas franco fina, reacción fuertemente ácida en algunos suelos y fertilidad moderada a baja. A nivel climático, se presenta temperatura media multianual de 12°C a 16°C, humedad relativa media multianual de 75% a 80% y precipitación anual de 1000 a 1500 mm, en relación con esta última, se registra una distribución bimodal siendo los meses de menor volumen de lluvia enero y julio con 50 mm y 100 mm, respectivamente, mientras que los meses de abril y octubre se registran precipitaciones cercanas a los 300 mm (IDEAM, 2022).

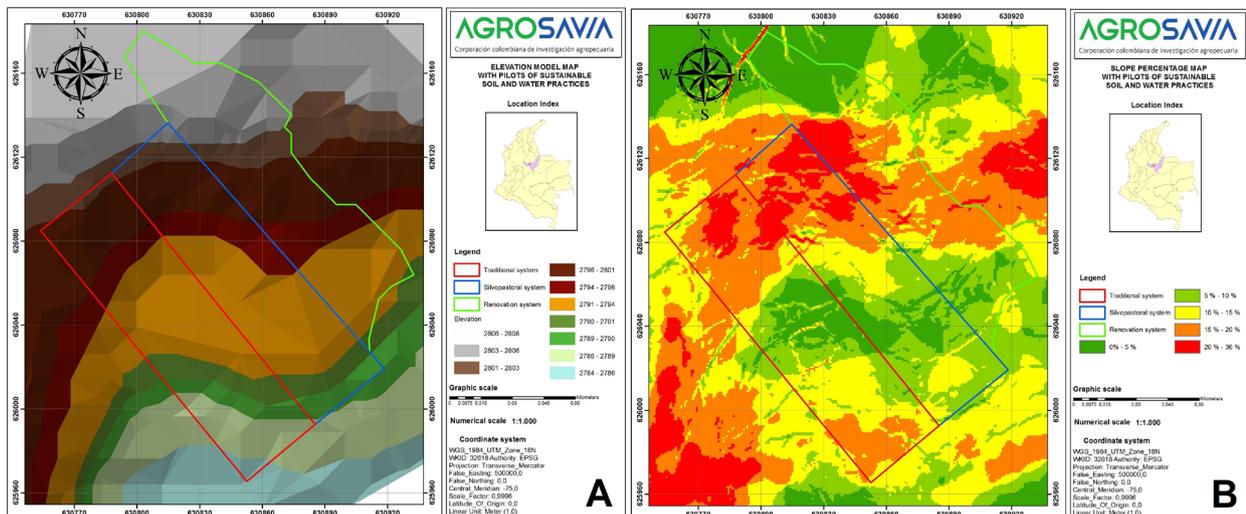


Figura 1. Mapas de elevación (A) y porcentaje de pendiente (B) del área de estudio. Fuente: elaboración propia a partir de Modelos Digitales de Elevación (DEM) de 30 m de la NASA y cartografía base del IGAC (Límites departamentales y municipales).

Tratamientos

Considerando la distribución de precipitaciones en la zona, se evaluó durante el primer y segundo semestre de 2022 el efecto de la implementación de tres sistemas de manejo de pasturas previamente establecidos en 2015, a saber: silvopastoral en arreglo en franjas de pastoreo (**SSP**), silvopastoral con renovación de praderas (**SRP**) y tradicional con praderas de pastoreo (**ST**). Se realizó un muestreo con trayecto Zig-Zag para la selección y georreferenciaron mediante GPS (Gpsmap® 76S) de 10 puntos equivalentes a una muestra de suelo (repetición) en la parte alta, media y baja de la pendiente; es decir, cada tratamiento contó con 10 muestras o repeticiones, finalmente, por cada muestra se tomaron tres submuestras separadas entre sí a 10 m y a una profundidad de 30 cm.

Análisis químico y físico de suelos

En el laboratorio de química analítica de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – AGROSAVIA localizado en el municipio de Mosquera, departamento de

Cundinamarca (Colombia), y según la norma ISO/IEC 17025:2017 se analizó en cada muestra: **i)** Carbono orgánico (Walkley & Black / Espectrofotometría VIS); **ii)** Aluminio y acidez intercambiable (KCl cuando pH < 5,5/ volumetría); **iii)** pH (Potenciometría según relación suelo: agua 1: 2,5); **iv)** Fósforo (Bray II); **v)** Azufre (Fosfato monobásico de calcio/espectrofotometría VIS), **vi)** Elementos menores (Fe, Mn, Cu y Zn por Olsen modificado/Espectrofotometría de absorción atómica) y **vii)** Conductividad eléctrica. Para las propiedades físicas se tomaron los mismos 10 puntos que cubrían la parte alta, media y baja de cada tratamiento, pero en este caso solo se tomaron dos cilindros por cada punto, donde se determinó: **i)** Densidad aparente (Gravimetría/ Anillo de volumen conocido); **ii)** Densidad real (Gravimetría/picnómetro) y **iii)** Curva de retención de humedad a 0,3 (Humedad a capacidad de campo), 1,0 (saturación), y 15 bares (Punto de marchitez permanente) (Gravimetría/Ollas de succión).

Diseño experimental y análisis estadístico

Se empleó un diseño experimental de parcelas divididas compuesto por las

tres áreas de manejo de pasturas. Previa comprobación de los supuestos estadísticos (normalidad y homogeneidad de varianza), mediante el software R 4.1.2 (Foundation for Statistical Computing) se aplicó un análisis de varianza multivariado (MANOVA) de dos vías, evaluando el efecto de los factores sistema productivo ($n=3$) y época de muestreo ($n=2$); sometiendo finalmente los datos a un análisis de varianza (ANOVA) aplicando la prueba de Tukey con un nivel de significancia del 5% para detectar diferencias.

Distribución espacial de las propiedades de los suelos

Mediante el uso de herramientas geoestadísticas (Spatial Analyst Tools y Spatial Statistics Tools) del software ArcGIS® Pro 2.9.0 (ESRI®) y el método determinístico de interpolación espacial distancia inversa ponderada (IDW – Inverse Distance Weight) y Autocorrelación Espacial mediante el índice de Moran (Moran's Index), se representaron cartográficamente las variables influenciadas significativamente por los factores analizados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Propiedades químicas y físicas de los suelos analizados

Según clasificación e interpretación de resultados para análisis de suelo del ICA (1992), el pH en las parcelas fue moderadamente ácido; la materia orgánica (MO) y por ende el carbono orgánico (CO) fueron altos; la conductividad eléctrica (CE) reflejó que los suelos no presentaban problemas por salinidad; la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE) fue media, indicando alta retención de nutrientes; la acidez (Al+H) y el aluminio intercambiable (Al) no reflejaron problemas de acidificación; el contenido de sodio (Na) fue bajo, los de

magnesio (Mg) cobre (Cu), zinc (Zn) y boro (B) medios, los de fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), azufre (S), hierro (Fe) y manganeso (Mn) fueron altos; las relaciones catiónicas fueron aceptables o ideales excepto para magnesio y potasio (Mg/K) en el ST, lo cual reflejó una deficiencia de Mg en el suelo. En cuanto a la densidad aparente y real, los resultados mostraron valores entre 0,47 y 1,03 g cm⁻³ para densidad aparente, y entre 2,07 y 2,46 g cm⁻³ para la real, mientras que las retenciones de humedad estuvieron entre 52,7% y 64,2 %.

La mayoría de las propiedades químicas y físicas de los suelos analizados en la presente investigación fueron similares en las tres parcelas y solo unas cuantas se vieron influenciadas por los factores evaluados (sistema de manejo de pastura y semestre de muestreo), coincidiendo con lo reportado por Lima *et al.* (2018) quienes demostraron que, aunque la implementación de sistemas silvopastoriles puede llegar a mejorar los contenidos de los nutrientes del suelo, el mayor efecto se da sobre las propiedades físicas, especialmente los relacionados con la infiltración de agua.

Efecto del sistema de manejo de pasturas sobre propiedades químicas y físicas de los suelos

El MANOVA de dos vías indicó que los factores individuales y la interacción entre estos incidieron significativamente sobre el conjunto de variables. El SSP registró mayor CE respecto a los demás tipos de manejo (Tabla 1); durante el primer semestre, los suelos reportaron mayor contenido de Na y menor contenido de P (Tabla 2); a nivel de interacción, los contenidos de Fe y Mn en suelo fueron superiores durante el primer y segundo semestre en el SRP y el Cu durante el primer semestre en el ST; para el caso de las propiedades físicas, el SSP

durante el segundo semestre registró mayor retención de humedad en las tensiones 1, 3 y 15 bares; mientras que, la DR fue menor

durante los dos semestre evaluados en este mismo sistema respecto a los demás (Tabla 3).

Tabla 1. Conductividad eléctrica de suelos bajo tres tipos de manejo de pasturas, municipio de Saboyá departamento de Boyacá, Colombia. **Fuente:** elaboración propia.

Tipo de manejo de pastura	CE dS m ⁻¹
SSP	0,54 a
SRP	0,45 b
ST	0,47 ab

Medias con distinta letra difieren estadísticamente según prueba de Tukey (P<0,05). **SSP:** Sistema silvopastoril; **SRP:** Sistema silvopastoril con renovación de praderas; **ST:** Sistema tradicional. **CE:** conductividad eléctrica.

Tabla 2. Contenidos de sodio y fosforo en suelos bajo sistemas de manejo de pasturas según época de muestreo, municipio de Saboyá departamento de Boyacá, Colombia. **Fuente:** elaboración propia.

Tiempo de muestreo	Na cmol ₍₊₎ kg ⁻¹	P mg kg ⁻¹
Semestre 1	0,15 a	85 b
Semestre 2	0,14 b	95 a

Medias con distinta letra difieren estadísticamente según prueba de Tukey (P<0,05).

Tabla 3. Propiedades químicas y físicas de suelos bajo tres sistemas de manejo de pasturas y dos épocas de muestreo, municipio de Saboyá departamento de Boyacá, Colombia. **Fuente:** elaboración propia.

Manejo * Tiempo	Fe		Cu		Mn		DR		RH1		RH3		RH15	
	mg kg ⁻¹		mg kg ⁻¹		g cm ⁻³		g cm ⁻³		%		%		%	
SSP * Semestre 1	519	ab	2,00	b	15,0	ab	2,20	b	56,0	b	54,0	c	53,0	b
SSP * Semestre 2	385	c	2,00	b	16,0	ab	2,20	ab	62,0	a	61,0	a	58,0	a
SRP * Semestre 1	615	a	2,50	ab	14,0	ab	2,20	ab	58,0	ab	56,0	bc	55,0	ab
SRP * Semestre 2	538	ab	2,00	ab	22,0	a	2,30	a	60,0	ab	59,0	ab	57,0	ab
ST * Semestre 1	533	ab	2,70	a	11,0	b	2,20	ab	59,0	ab	57,0	abc	56,0	ab
ST * Semestre 2	477	bc	2,30	ab	14,0	ab	2,30	a	58,0	ab	57,0	abc	54,0	ab

Medias con distinta letra difieren estadísticamente según prueba de Tukey (P<0,05). **SSP:** Sistema silvopastoril; **SRP:** Sistema silvopastoril con renovación de praderas; **ST:** Sistema tradicional. **Fe:** hierro; **Cu:** cobre; **Mn:** manganeso; **DR:** densidad real; **RH1:** retención de humedad a 1 bar; **RH3:** retención de humedad a 3 bares; **RH15:** retención de humedad a 15 bares.

Espacialmente, el índice de Moran (IM) reveló una distribución dispersa (*IM negativo*) para la DR durante el primer semestre en el SSP y aleatoria (*IM negativo*) en la mayoría de las variables, excepto en Fe, Cu, Na, P y RTH en las tensiones de 1, 3 y 15 bares durante el primer semestre; y CE, Cu, Fe, Mn, Na y P en el segundo semestre; las cuales junto a CE,

Cu, Fe y P durante el primer semestre y CE y P en el segundo semestre en el SRP; Fe y Na en el ST durante el primer y segundo semestre, respectivamente, presentaron una distribución agrupada (*IM positivo*).

Tanto en el primer como el segundo semestre, el SSP registró mayor CE (0,56

dS m⁻¹ a >0,70 dS m⁻¹); los valores más altos se apreciaron al sureste y suroeste de las parcelas de SSP y ST (0,40 dS m⁻¹ a >0,56 dS m⁻¹), respectivamente; en tanto que, para el SRP se ubicó al este y noroeste durante el primer (0,52 dS m⁻¹ a >0,60 dS m⁻¹) y segundo semestre (0,47 dS m⁻¹ a >0,52 dS m⁻¹), respectivamente (Figura 2 A).

El contenido de Na fue superior durante el primer semestre respecto al segundo en todas las parcelas (Tabla 2), con rangos de <0,15 cmol₍₊₎ kg⁻¹ a >0,18 cmol₍₊₎ kg⁻¹; el mayor contenido del elemento durante dicho periodo se ubicó al sureste y este de las parcelas SSP (0,14 cmol₍₊₎ kg⁻¹) y SRP (0,16 cmol₍₊₎ kg⁻¹), respectivamente; en tanto que en la parcela ST presentó una distribución uniforme con valores inferiores a 0,14 (cmol₍₊₎ kg⁻¹) (Figura 2 B).

Aunque la CE fue superior en los SSP y SRP en comparación con el ST (Tabla 1); al estar en un rango relativamente bajo, no representó un riesgo de salinización tal como lo indica FAO (2022), lo cual refleja la disminución de Na del primer al segundo muestreo (Tabla 2 y Figura 2 B). En este contexto, el resultado observado sobre la CE pudo estar influenciado por otros factores del suelo tal como lo reportan Carrera-Villacrés *et al.* (2014) y Romero *et al.* (2009), quienes indican que esta propiedad está regulada por la porosidad, concentración de electrolitos disueltos, textura, cantidad y composición de los coloides, contenido de agua, entre otros.

Contrario a lo presentado con el Na, el contenido de P se incrementó en todas las parcelas en el segundo semestre (Tabla 2) con valores entre <68,8 mg kg⁻¹ a >112 mg kg⁻¹; observándose mayor contenido al noroeste de la parcela SRP (101 mg kg⁻¹ a >112 mg kg⁻¹), mientras que, para los SSP y ST, estos se apreciaron al noreste y suroeste, con valores entre 103 mg kg⁻¹ a >108 mg kg⁻¹

y 95,3 mg kg⁻¹ a 109 mg kg⁻¹; respectivamente (Figura 2 C). Este elemento presentó una correlación positiva altamente significativa (P<0,001) con la pendiente del terreno (Figura 1) (P = 76,6 + 1,04 ^{Pendiente} R² = 15,2%); es decir que, al incrementarse 1% la pendiente, aumentó en 1,04 mg kg⁻¹ el contenido de P en suelo.

Los resultados sobre el contenido de P obtenidos en la presente investigación (Tabla 2 y Figura 2 C) concuerdan con lo mencionado por Hoosbeek *et al.* (2016) y Zin-Battisti *et al.* (2018) quienes concluyeron que la implementación de manejo silvopastoril de praderas aumentan los contenidos del elemento en el suelo, en parte por el retorno a través de la hojarasca que cae en la superficie, además de un aporte de los desechos de los animales bajo el sombrío de los árboles. Partiendo de la distribución espacial del P en las parcelas y el efecto de la pendiente sobre este, el resultado puede ser interpretado como un escurrimiento o lavado del nutriente hacia las partes bajas del terreno, concordando con Chagas y Kraemer (2018) y Mackay-Smith *et al.* (2022), quienes indican que el movimiento de formas disueltas y particuladas de P se asocian a escorrentía superficial y procesos erosivos, principalmente en suelos de ladera y sin componentes arbóreos.

Partiendo de las interacciones identificadas con anterioridad (Tabla 3), en el SSP se observó mayor contenido de Fe durante el primer semestre con valores entre 630 mg kg⁻¹ a >683 mg kg⁻¹ en la mayor parte de la parcela (Figura 2 D) y de Mn durante el segundo semestre, con valores entre 26,7 mg kg⁻¹ a >32,8 mg kg⁻¹ al noroeste de esta (Figura 2 E); mientras que, el mayor contenido de Cu se reportó en el ST durante el primer semestre con valores entre 3,01 mg kg⁻¹ a >3,41 mg kg⁻¹ hacia el noreste, oeste y sureste de la parcela (Figura 2 F).

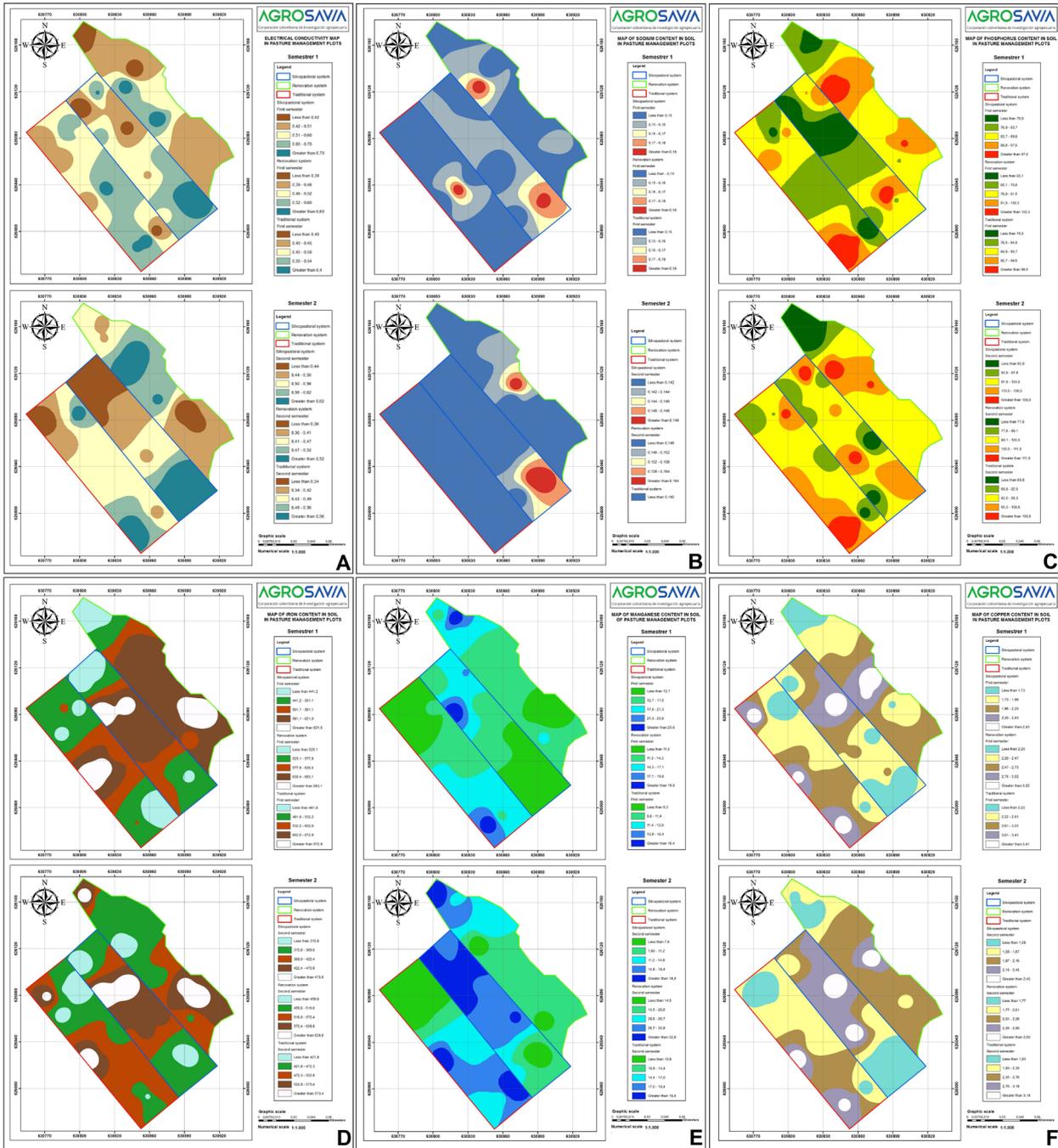


Figura 2. Distribución espacial de propiedades químicas de suelo en parcelas de manejo de pasturas. **A)** CE (dS m⁻¹), **B)** Na (cmol₍₊₎ kg⁻¹), **C)** P (mg kg⁻¹), **D)** Fe (mg kg⁻¹), **E)** Mn (mg kg⁻¹), **F)** Cu (mg kg⁻¹). **Fuente:** elaboración propia a partir de datos del proyecto y cartografía base del Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC.

El efecto combinado de los factores sobre el contenido de los micronutrientes Fe, Mn y Cu del primer al segundo muestreo, observado en la presente investigación coincide con lo reportado por Lanna-Reis *et al.* (2010) y González-Marcillo *et al.* (2021)

quienes a pesar de reportar disminución principalmente de Fe durante la segunda temporada de evaluación, atribuido en parte a condiciones climáticas y componentes forestales; indican mayor disponibilidad de los elementos por su incorporación al suelo a

través del estiércol del ganado en sistemas con mayor diversificación de especies vegetales.

A pesar de que se presentó un incremento de la DR del primer al segundo semestre, está fue inferior en los dos periodos en el SSP, con valores $< 2,11 \text{ g cm}^{-3}$ a $2,26 \text{ g cm}^{-3}$ en gran parte de la parcela, excepto al sureste de esta (Figura 3 A); mientras que, para este mismo sistema de manejo, la mayor retención de humedad en las tres tensiones se observó durante el segundo semestre al noreste de la

parcela con valores entre 62,7 % a $> 64,6 \%$, 61,8 % a $> 63,8 \%$ y 58,6 % a $62,3 \%$, para las tensiones 1, 3 y 15 bares, respectivamente (Figura 3 B - D). En este contexto, Ingaramo *et al.* (2007) mencionan que, la DR se considera una de las propiedades más estables del suelo y normalmente no se ve afectada por los tratamientos que se aplican en el mismo, además argumentan que, una leve disminución de la densidad real podría presentarse si se efectuasen importantes y continuos aportes de materia orgánica, pero esta reducción no sería significativa.

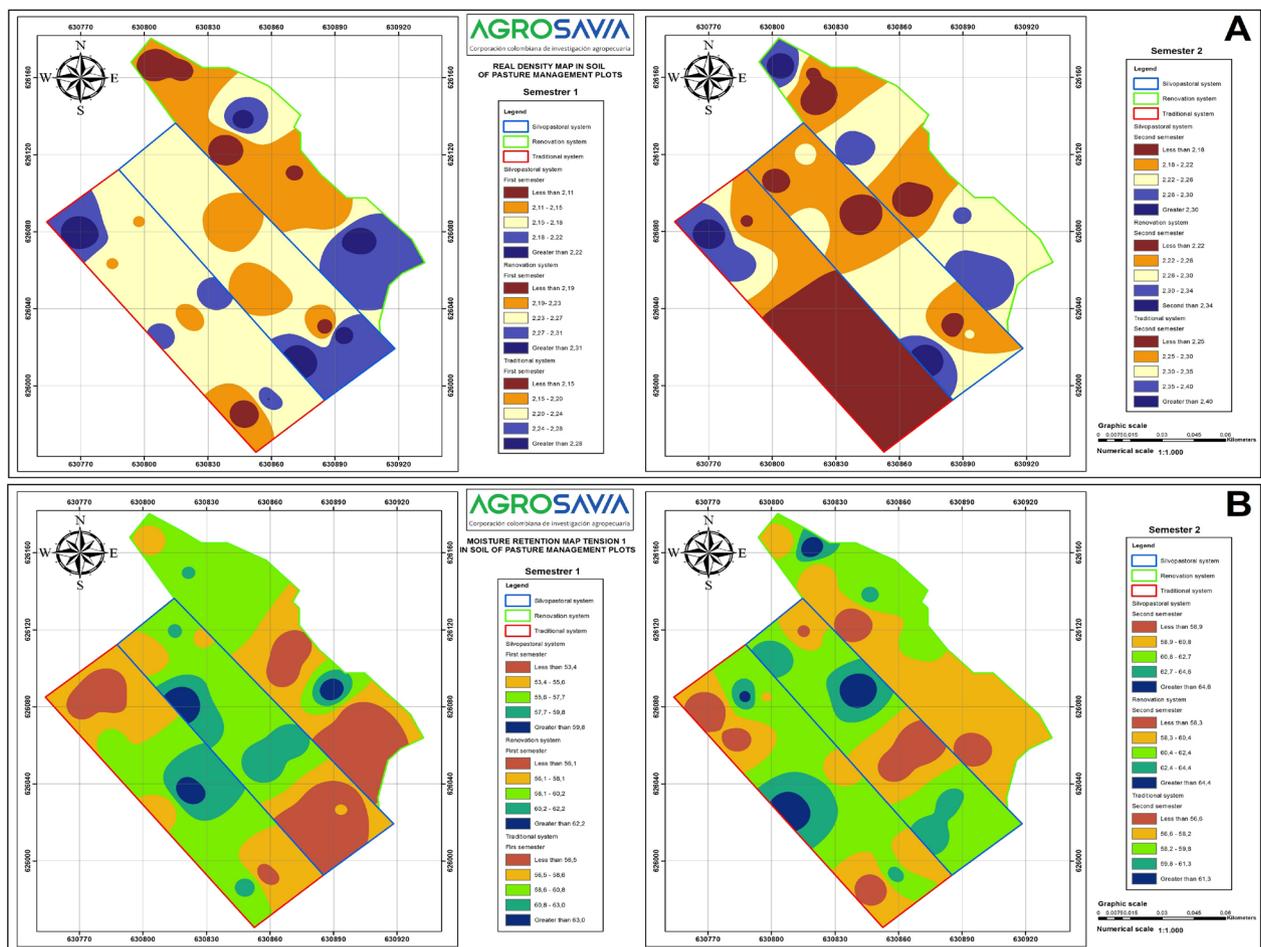
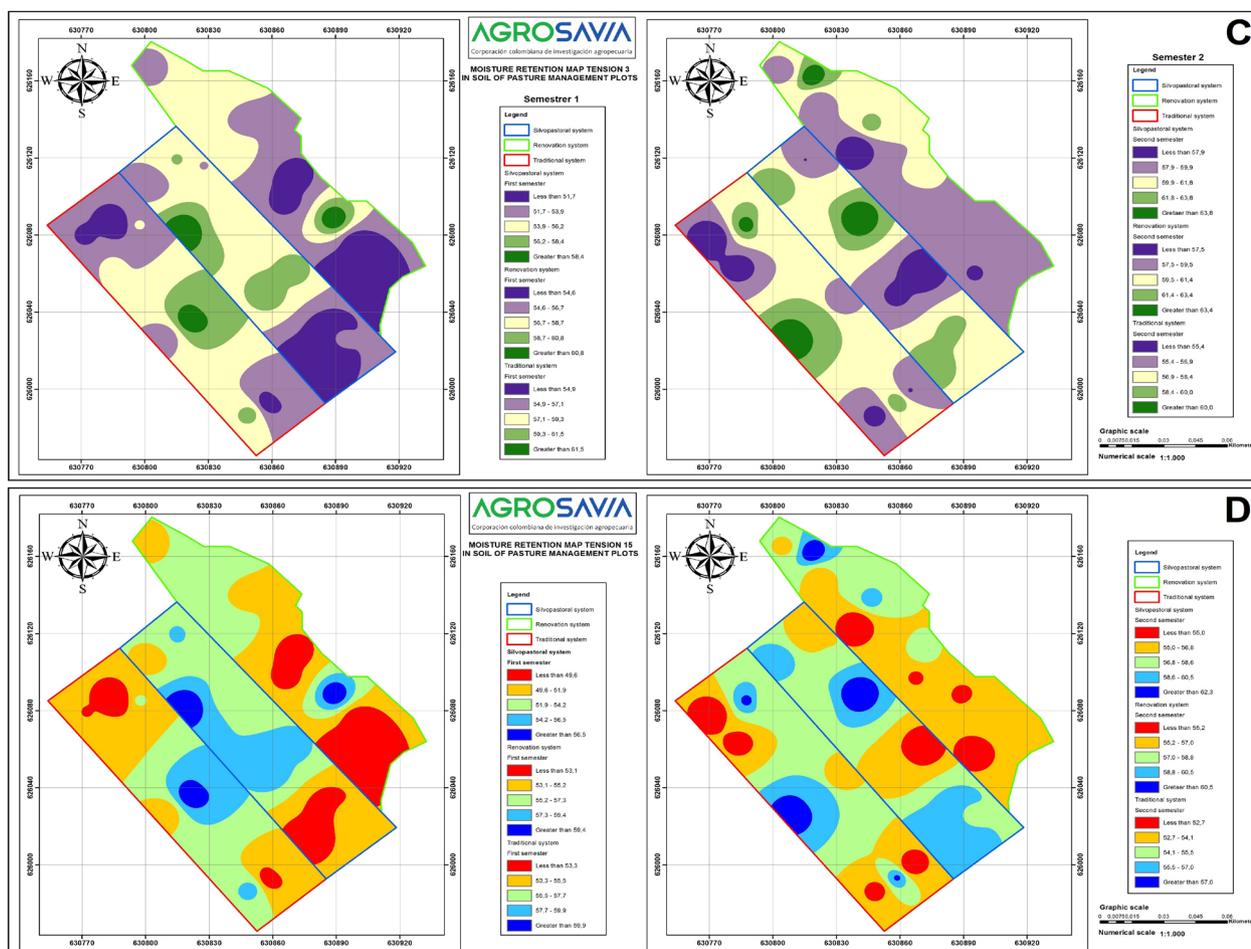


Figura 3. Distribución espacial de propiedades físicas de suelo en parcelas de manejo de pasturas en cada semestre (semestre 1 a la izquierda y semestre 2 a la derecha). **A)** Densidad real (DR g cm^{-3}), **B)** Retención de humedad a tensión 1 bar, **C)** Retención de humedad a tensión 3 bares, **D)** Retención de humedad a tensión 15 bares. Fuente: elaboración propia a partir de datos del proyecto y cartografía base del Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC.



Continuación Figura 3. Distribución espacial de propiedades físicas de suelo en parcelas de manejo de pasturas. **A)** DR ($g\ cm^{-3}$), **B)** Retención de humedad a tensión 1 bar, **C)** Retención de humedad a tensión 3 bares, **D)** Retención de humedad a tensión 15 bares. Fuente: elaboración propia a partir de datos del proyecto y cartografía base del Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC.

Los resultados obtenidos en la presente investigación confirman el impacto positivo de la inclusión del componente arbóreo en los agroecosistemas, concordando con lo reportado por otros autores; y los cuales se relacionan principalmente con la estructura del suelo, la estabilización de la materia orgánica, porosidad y, en consecuencia, con la reducción de la erosión y la capacidad de retención de agua (Vazquez *et al.*, 2020; Bejar-Pulido *et al.*, 2020; Polanía-Hincapié *et al.*, 2021). En este sentido, Vazquez *et al.* (2020), Wang *et al.* (2022) y Giraldo y Chará (2022) reportan que, los sistemas

silvopastoriles con la diversificación de pastos, incorporación de leguminosas, hierbas y/o árboles, son claves para disminuir la densidad del suelo, a la vez que incrementan la riqueza de macrofauna y el mejoramiento de los macroagregados; mientras que, Dulorme *et al.* (2004) y Bosi *et al.* (2018) indican que, el contenido de agua tiende a ser mayor cerca de los árboles, principalmente por la interceptación de la lluvia, la generación de un microclima que reduce la evapotranspiración y posibles mejoras en la estructura de los suelos, causadas por las raíces de los árboles.

CONCLUSIONES

Los resultados en la presente investigación ratifican los beneficios agroecológicos de la implementación de sistemas silvopastoriles en la ganadería del trópico alto, especialmente con la mejora de las propiedades físicas de los suelos. Adicionalmente, resalta la importancia de incluir el componente arbóreo para mejorar a mediano y largo plazo, las propiedades físicas y químicas del suelo, al tiempo que permite intensificar sosteniblemente las actividades de pastoreo. Finalmente, se recomienda evaluar durante periodos de tiempo más largos el efecto del manejo sostenible de pasturas e incluir aspectos ambientales relacionados con posibles emisiones de gases de efecto invernadero.

AGRADECIMIENTOS

Estos resultados hacen parte del proyecto "Cooperación Técnica Regional TCP/RLA/3805 (D): Apoyo a la cooperación regional para la gestión climática de los ecosistemas agrícolas con énfasis en agua y suelo", financiado con recursos de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) y el proyecto ID1002183 "Estrategias de producción eficiente y sostenible para sistemas de ganadería de leche del trópico alto" ejecutado por la Corporación colombiana de investigación agropecuaria – AGROSAVIA.

Conflictos de intereses

La preparación y revisión del presente manuscrito contó con la participación de todos los autores, quienes declaramos que no existe ningún conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados.

REFERENCIAS

- Bejar-Pulido, S., Cantú-Silva, I., Yáñez-Díaz, M. y Luna-Robles, E. 2020.** Curvas de retención de humedad y modelos de pedotransferencia en un Andosol bajo distintos usos de suelo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 11(59): 1-20.
<https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i59.666>
- Bosi, C., Pezzopane, J. y Sentelhas, P. 2018.** Soil water availability in a full sun pasture and in a silvopastoral system with eucalyptus. *Agroforestry Systems* 94: 429-440.
<https://doi.org/10.1007/s10457-019-00402-7>
- Bueno-López, L. y Camargo-García, J. 2015.** Nitrógeno edáfico y nodulación de *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit en sistemas silvopastoriles. *Acta Agronómica* 64 (4): 349-354. <http://dx.doi.org/10.15446/acag.v64n4.45362>
- Camero-Rey, A. y Rodríguez-Díaz, H. 2014.** Características químicas del suelo, producción forrajera y densidad poblacional de lombrices en un sistema silvopastoril en la zona Huetar Norte de Costa Rica. *Tecnología en Marcha* 28(1): 91-104. http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0379-39822015000100091&lng=en&tlng=es
- Carrera-Villacrés, D., Guevara-García, P. y Gualichomin-Juiña, G. 2014.** Caracterización físico-química desde el punto de vista agrícola de los suelos en la zona de riego del proyecto multipropósito Chone. 71-80 pp. *Memorias IX Congreso de Ciencia y Tecnología ESPE 2014*. Sangolquí - Ecuador.
<https://doi.org/10.24133/cctespe.v9i1.87>

- Chagas, C. y Kraemer, F. 2018.** Escurrimiento, erosión del suelo y contaminación de los recursos hídricos superficiales por sedimentos asociados a la actividad agropecuaria extensiva: algunos elementos para su análisis. 1a ed. Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Editorial Facultad de Agronomía. p3-4. ISBN: 978-987-3738-17-3. <https://www.agro.uba.ar/catalog/escurrimiento-erosion-del-suelo-y-contaminacion-de-los-recursos-hidricos-superficiales-por>
- Contreras-Santos, J., Martínez-Atencia, J., Cadena-Torres, J. y Falla-Guzmán, K. 2020.** Evaluación del carbono acumulado en suelo en sistemas silvopastoriles del Caribe colombiano. *Agronomía Costarricense* 44(1): 29-41. <https://doi.org/10.15517/RAC.V44I1.39999>
- Dulorme, M., Sierra, J., Bonhomme, R. y Cabidoche, Y. 2004.** Seasonal changes in tree-grass complementarity and competition for water in a subhumid tropical silvopastoral system. *European Journal of Agronomy* 21(3): 311-322. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2003.10.003>
- Etter, A. y Zuluaga, A.F. 2018.** Áreas aptas para la actividad ganadera en Colombia: análisis espacial de los impactos ambientales y niveles de productividad de la ganadería. En Moreno, L. A., Rueda, C. y Andrade, G. I. (Eds.). 2018. *Biodiversidad 2017. Estado y tendencias de la biodiversidad continental de Colombia*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá, D. C., Colombia. <http://reporte.humboldt.org.co/biodiversidad/2017/cap4/402/>
- FAO – Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. 2022.** Portal de Suelos de la FAO: Manejo de suelos problemáticos / el manejo de suelos afectados por salinidad. <https://www.fao.org/soils-portal/soil-management/manejo-de-suelos-problematicos/es/>
- Fuentes-Hernández, A. Mendoza-Orozco, M., Ríos-Casanova, L., Soler-Aburto, A., Muñoz-Iniestra, D. y Godínez-Álvarez, H. 2019.** Impacto de la agricultura y ganadería sobre el bosque tropical seco de Zirándaro, Guerrero: Una evaluación con indicadores ecológicos. *Botanical Sciences* 97 (2): 148-154. <https://doi.org/10.17129/botsci.2043>
- Giraldo, N. y Chará, J. 2022.** Efecto de los sistemas silvopastoriles intensivos en la reducción de la degradación física y biológica del suelo. *Livestock Research for Rural Development*. 34(17). <http://www.lrrd.org/lrrd34/3/3417vicky.html>
- Gobernación de Boyacá. 2018.** Ordenamiento territorial departamental de Boyacá: Productividad sector agropecuario. <http://www.dapboyaca.gov.co/wp-content/uploads/2018/09/PRODUCTIVIDAD-SECTOR-AGROPECUARIO.pdf>
- González, C., Quintero, L., Valderrama, P., Samacá, H., Giraldo, J., Romero, C., Arguello, R., Parra, L., Viveros, J., Becerra, I., Ríos, M., Maluendas, A., Díaz, A., Reina, D., Castellanos, J. y Leyva, F. 2020.** Plan de ordenamiento productivo análisis situacional de la cadena láctea. Bogotá: UPR. <https://www.upra.gov.co/plan-de-ordenamiento-productivo-para-la-cadena-lactea>

- González-Marcillo, R., Castro-Guamán, W., Guerrero-Pincay, A., Vera-Zambrano, P., Ortiz-Naveda, N. y Guamán-Rivera, S. 2021.** Assessment of Guinea Grass *Panicum maximum* under silvopastoral systems in combination with Two management systems in Orellana Province, Ecuador. *Agriculture*. 11(2): 1-17. <https://doi.org/10.3390/agriculture11020117>
- Hoosbeek, M., Remme, R. y Rusch, G. 2016.** Trees enhance soil carbon sequestration and nutrient cycling in a silvopastoral system in south-western Nicaragua. *Agroforestry Systems* 1-11. <https://doi.org/10.1007/s10457-016-0049-2>
- Ibrahim, M., Chacón, M., Cuartas, C., Naranjo, J., Ponce, G., Vega, P., Casasola, F. y Rojas, J. 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. https://www.researchgate.net/publication/259175646_Almacenamiento_de_carbono_en_el_suelo_y_la_biomasa_arborea_en_sistemas_de_usos_de_la_tierra_en_paisajes_ganaderos_de_Colombia_Costa_Rica_y_Nicaragua
- ICA - Instituto Colombiano Agropecuario. 1992.** Fertilización en diversos cultivos: Quinta aproximación. Manual de Asistencia Técnica No. 25. Instituto Colombiano Agropecuario. (Colombia). Produmedios, Bogotá D.C. pp20-21. <https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/14124>
- ICA - Instituto Colombiano Agropecuario. 2022.** Censos pecuarios nacional: Censo bovino en Colombia 2022. <https://www.ica.gov.co/areas/pecuaria/servicios/epidemiologia-veterinaria/censos-2016/censo-2018>
- IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. 2022.** Atlas climatológico de Colombia 1981-2010. <http://atlas.ideam.gov.co/presentacion/>
- IGAC - Instituto Geográfico Agustín Codazzi. 2022.** Mapas de suelos del territorio colombiano a escala 1:100.000. Departamento: Boyacá. Subdirección de Agrología, Datos abiertos Agrología, Geoportal IGAC. <https://geoportal.igac.gov.co/contenido/datos-abiertos-igac>
- Ingaramo, O.E., Paz Ferreiro, J., Mirás Avalos, J.M. y Vidal Vázquez, E. 2007.** Caracterización de las propiedades generales del suelo en una parcela experimental con distintos sistemas de laboreo. *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe* 32: 127 – 137. <https://ruc.udc.es/dspace/handle/2183/6334>
- Lanna-Reis, G., Quintão-Lana, A., Martins-Maurício, R., Quintão-Lana, R., Matta-Machado, R., Borges, I. y Quinzeiro-Neto, T. 2010.** Influence of trees on soil nutrient pools in a silvopastoral system in the Brazilian Savannah. *Plant Soil* 329: 185–193. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0144-5>
- Lima, H.N., Dubeux Jr, J.C., Santos, M.V., Mello, A.C., Lira, M.A. y Cunha, M. V. 2018.** Soil attributes of a silvopastoral system in Pernambuco Forest Zone. *Tropical Grasslands - Forrajes Tropicales* 6(1): 15–25. [https://doi.org/10.17138/tgft\(6\)15-25](https://doi.org/10.17138/tgft(6)15-25)
- Mackay-Smith, T., Burkitt, L., López, I., y Reid, J. 2022.** The impact of a kānuka silvopastoral system on surface runoff and sediment and nutrient losses in New Zealand hill country. *CATENA* 213: 1-47. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106215>

- Medina, C. 2016.** Efectos de la compactación de suelos por el pisoteo de animales, en la productividad de los suelos. *Remediaciones. Revista Colombiana de Ciencia Animal* 8(1): 88-93. <https://doi.org/10.24188/recia.v8.n1.2016.229>
- Murgueitio, E. 2003.** Impacto ambiental de la ganadería de leche en Colombia y alternativas de solución. *Livestock Research for Rural Development* 15(78): 35-43. <https://lrrd.cipav.org.co/lrrd15/10/murg1510.htm>
- Polanía-Hincapié, K., Olaya-Montes, A., Cherubin, M., Herrera-Valencia, W., Ortiz-Moreno, F., Silva-Olaya, A. 2021.** Soil physical quality responses to silvopastoral implementation in Colombian Amazon. *Geoderma* 386: 114900. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114900>
- Portilla-Pinzón, D., Barragán-Hernández, W., Carvajal-Bazurto, C., Cajas-Girón, Y. y Rivero-Espitia, S. 2015.** Establecimiento de sistemas silvopastoriles para la región Caribe. Bogotá (Colombia): Corpoica. p19-29. ISBN: 978-958-740-196-7. <https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/12655>
- Ríos, N., Jiménez, F., Ibrahim, M., Andrade, H. y Sancho, F. 2006.** Parámetros hidrobiológicos de la cobertura vegetal en sistemas de producción ganadera en la zona de recarga de la cuenca del río Jabonal, Costa Rica. *Recursos Naturales y Ambientales* 48: 111-117. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/6628>
- Romero, M., Santamaría, D. y Zafra, C. 2009.** Bioingeniería y suelo: Abundancia microbológica, pH y conductividad eléctrica bajo tres estratos de erosión. *Umbral Científico* 15: 67-74. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30415144008>
- Vallejo, V., Averly, Z., Terán, W., Lorenz, N., Dick, R. y Roldán, F. 2012.** Effect of land management and *Prosopis juliflora* (Sw.) DC trees on soil microbial community and enzymatic activities in intensive silvopastoral systems in Colombia. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 150: 139-148. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.01.022>
- Vazquez, E., Teutscherova, N., Lojka, B., Arango, J. y Pulleman, M. 2020.** Pasture diversification affects soil macrofauna and soil biophysical properties in tropical (silvo)pastoral systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 302: 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107083>
- Wang, J., Qin, X., Tan, Y., Yang, Y. y Ping, X. 2022.** Impact of silvopastoral system on the soil physicochemical properties in China: A meta-analysis. *Agroforestry Systems* 1-14. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2061376/v1>
- Zin-Battisti, L., Schmitt-Filho, A., Loss, A. y de Almeida-Sinisgalli, P. 2018.** Soil chemical attributes in a high biodiversity silvopastoral system. *Acta Agronómica* 67(4): 486-493. <https://doi.org/10.15446/acag.v67n4.70180>