

Índice de Calidad del Suelo Bajo Sistemas Agropecuarios en el Bosque Seco Tropical-Colombia Soil Quality Index for Agricultural Systems in the Tropical Dry Forest-Colombia

José Luis Contreras-Santos^{1†}, Judith Martínez-Atencia¹, José Luis Rodríguez-Vitola¹,
Wilson Barragán-Hernández², Jeyson Garrido-Pineda¹ y Cindy Katherine Falla-Guzmán¹

¹ Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, Centro de investigación Turipana. Vía Montería-Cereté km 13. 250047 Córdoba Montería, Colombia; (J.L.C.S.), (J.M.A.), (J.L.R.V.), (J.G.P.), (C.K.F.G.).

[†] Autor para correspondencia: jlcontreras@agrosavia.co

² Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, Centro de investigación El Nus. Corregimiento San José del Nus. 053037 San Roque, Antioquia, Colombia; (W.B.H.).

RESUMEN

En las últimas décadas, la creciente demanda de alimentos, asociada al aumento demográfico conllevó a la transformación de áreas boscosas o ecosistemas naturales en tierras de producción agropecuaria. El uso de índices de calidad de suelo permite mejor comprensión del nivel de degradación o mejoría que puede tener el suelo bajo diferentes sistemas agropecuarios, lo que favorece la toma de decisiones y la selección de prácticas de gestión sostenibles. El objetivo de este trabajo fue evaluar el índice de calidad de suelo (ICS) en diferentes sistemas agropecuarios, como estrategia en la toma de decisiones para la conservación y rehabilitación de los suelos en el Caribe colombiano. En los departamentos de Atlántico, Córdoba, Bolívar, Sucre, Cesar y Magdalena, se seleccionaron cuatro sistemas de uso de la tierra: sistema forestal comercial (Forestal), sistemas de praderas de ganadería tradicional (Pr), sistemas Agroforestales con cacao (SAF) y sistemas silvopastoriles (SSP); en cada uno se evaluaron variables físicas, químicas y biológicas del suelo con el fin de calcular los ICS. La implementación de SSP favoreció la acumulación de materia orgánica y capacidad de intercambio catiónico (CIC), entre 25 y 29% más que los sistemas monocultivo forestal y Pr. La diversidad biológica del suelo fue mayor dentro de los sistemas asociados con especies arbóreas. La CIC fue el indicador de suelo de mayor relevancia en la construcción del índice, con un aporte de entre 34.7 al 41.2% del valor total del ICS. El conjunto mínimo de datos seleccionados estuvo conformado por CIC, resistencia mecánica a la compactación, porcentaje de arena (A), orden isóptera, pH y contenido de fósforo. El sistema de uso de suelo con mayor ICS fue SAF (0.77), seguido de SSP (0.66). La inclusión de especies arbóreas dentro de los sistemas de producción mejora la calidad del suelo, aumentando la captura de carbono en el suelo en más de 19% dentro de SSP.

Palabras clave: agroforestería, carbono orgánico del suelo, organismos del suelo, plantas leñosas, propiedades del suelo.

SUMMARY

In recent decades, food growing demand associated with population growth has led to the transformation of forested areas or natural ecosystems into land for agricultural production. The use of soil quality indices allows a better understanding of soil degradation or improvement level under different agricultural systems, which favors decision-making and the selection of sustainable management practices. Thus, the objective of this research is to evaluate soil quality indices (ICS) in different



Cita recomendada:

Contreras-Santos, J. L., Martínez-Atencia, J., Rodríguez-Vitola, J. L., Barragán-Hernández, W., Garrido-Pineda, J., & Falla-Guzmán, C. K. (2023). Índice de Calidad del Suelo Bajo Sistemas Agropecuarios en el Bosque Seco Tropical-Colombia. *Terra Latinoamericana*, 41, 1-18. e1694. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1694>

Recibido: 8 de febrero de 2023.

Aceptado: 20 de junio de 2023.

Artículo. Volumen 41.

Noviembre de 2023.

Editor de Sección:

Dr. Francisco Bautista Zúñiga

Editor Técnico:

Dr. Marco Antonio Camacho Escobar



Copyright: © 2023 by the authors.

Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC ND) License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

agricultural systems, as a decision-making strategy for soil conservation and rehabilitation in the Colombian Caribbean region. Four land use systems were selected in the departments of Córdoba, Bolívar, Sucre, Cesar, and Magdalena: commercial forestry (Forestry), traditional livestock pasture (Pr), Agroforestry with Cocoa (SAF) and silvopastoral (SSP) systems. In each land use, the systems were evaluated with soil physical, chemical, and biological variables to calculate ICS. The implementation of SSP increased organic matter accumulation and cation exchange capacity (CEC) in the range from 25 to 29% more than forest monoculture and Pr systems. Soil biological diversity was higher within systems associated with tree species. CIC was the most relevant soil indicator in the soil index construction with a contribution from 34.7 to 41.2% of the ICS total value. The minimum set of selected data was made up of CEC, mechanical resistance to compaction, sand percentage (A), order Isoptera, pH and phosphorus content. The land use system with the highest ICS was SAF (0.77), followed by SSP (0.66). The inclusion of tree species within production systems improves soil quality, increasing soil carbon sequestration by more than 19% within SSP.

Index words: agroforestry, soil organic carbon, soil organisms, woody plants, soil properties.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas en diferentes regiones de América latina y el Caribe la creciente demanda de alimentos asociada al aumento demográfico y económico, ha conllevado a la expansión de la frontera agrícola y pecuaria en áreas no aptas (Bedolla-Rivera *et al.*, 2020; FAO, 2015), lo que ha ocasionado la pérdida de biodiversidad, reducción de cobertura vegetal, y disminución de organismos benéficos en el suelo (Chará *et al.*, 2015); así como la reducción de los bienes y servicios ambientales ofertados por la naturaleza (p. ej.: bosques nativos) (Gomez, von Müller, Tarabini y La Manna, 2022).

Desde diferentes ámbitos de investigación (técnico, social, cultural, económico, ambiental y político), la búsqueda de alternativas que permitan revertir o mitigar la degradación ambiental y edáfica, derivadas de la producción de alimentos, ha conllevado a la construcción de políticas públicas con enfoque de sostenibilidad (ONU, 2015; Sampaio-Torrens, 2020). En este sentido, una de las estrategias tecnológicas implementadas en los sistemas de producción ganaderos es el asocio de especies de gramíneas con especies arbóreas o arbustivas nativas de importancia económica, con alto potencial de captura de carbono (Contreras-Santos, Martínez y Falla, 2021a; Contreras-Santos, Martínez, Raghavan, López y Garrido, 2021b) y aporte de nutrientes al suelo (Martínez-Atencia, Loaiza, Osorio, Correa y Casamitjana, 2020). En otro ámbito (p. ej.: agricultura industrializada), se busca generar opciones de manejo, conservación o rehabilitación de áreas de suelo degradado (Tamayo y Alegre, 2022), como estrategia para una agricultura climáticamente inteligente sostenible, adaptada y resiliente a los efectos de la variabilidad y cambio climático (Gutiérrez-Rua, Posada y González, 2019; Paredes-Chacín, Lopez y Cajigas, 2019).

La efectividad de las estrategias de conservación o mitigación del suelo en sistemas de producción agropecuarios, se puede evidenciar en la mejora de los procesos que se desarrollan en el suelo (físicos, químicos y biológicos). Una de las formas de evaluar cambios en el suelo es mediante el conocimiento de su calidad (Sarmiento-Reyes, Fandiño-Zabala y Gómez, 2018), que de acuerdo con Karlen *et al.* (1997), es definida como la "Capacidad del suelo bajo un determinado manejo o franja ecosistémica para sostener la productividad biológica, preservar las funciones ambientales, promover el desarrollo vegetal y animal y consecuentemente la salud humana". La calidad del suelo se mide a través de indicadores que muestran sensibilidad a los cambios antrópicos generados durante el proceso de producción de alimentos; estos indicadores son de orden físico, químico o biológicos; los cuales proporcionan información del uso y manejo del suelo en diferentes ambientes y a lo largo del tiempo (Silva-Olaya *et al.*, 2022; Vallejo, 2013). La disminución de la calidad del suelo reduce la capacidad de los sistemas en ofertar servicios ecosistémicos, lo que desfavorece su capacidad productiva (Fu *et al.*, 2015; Velasquez y Lavelle, 2019).

Los indicadores de calidad del suelo presentan diversos costos de evaluación dependiendo de la intensidad o periodicidad, pero los costos de evaluación y análisis hacen que esta aproximación de diagnóstico sea poco factible desde el punto de vista económico. La selección efectiva de indicadores edáficos con alta sensibilidad a

cambios en el suelo, de fácil determinación e interpretación, son insumos importantes en la planificación y toma de decisiones en el corto y mediano plazo dentro de los sistemas de producción agropecuarios (Cherubin *et al.*, 2016). Para tal fin, varios autores reportan que existen diferentes metodologías, entre las que se enuncian: 1. criterio de expertos (Cuadro 1 y 2). 2. identificación de un conjunto mínimo de datos (CMD) y 3. análisis de componentes principales (ACP) (González-García, González, Rodríguez, León y Betancourt, 2021; Silva-Olaya *et al.*, 2022; Li *et al.*, 2022).

La integración de indicadores edáficos (físicos, químicos o biológicos) en un índice de calidad del suelo (ICS), es una aproximación práctica a la evaluación integral de los indicadores, debido que permite mejor comprensión del nivel de degradación o mejoría que puede tener el suelo bajo diferentes sistemas agropecuarios, lo que favorece la toma de decisiones y la selección de prácticas de gestión sostenibles que deben ser implementada. Por lo anterior, en esta investigación se plantearon dos objetivos: 1. identificar un conjunto mínimo de datos (CMD) que explicaran la calidad del suelo; y, 2. evaluar la calidad del suelo por medio de índices de calidad de suelo (ICS) en sistemas agropecuarios (Sistema forestal, sistemas de praderas ganadería tradicional - Pr, sistemas Agroforestales con cacao - SAF y Sistemas silvopastoriles - SSP) en la región Caribe colombiana; como estrategia en la toma de decisiones para la conservación, rehabilitación y restauración edáfica.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitios de Estudio y Uso del Suelo

El estudio se realizó en diferentes usos de suelo (silvopastoril, agroforestal, forestal y sistemas tradicionales de ganadería), ubicados en la región Caribe colombiana, en los departamentos de Atlántico, Córdoba, Bolívar, Sucre, Cesar y Magdalena (Figura 1). Los sitios de muestreo registraron condiciones, topográficas, edáficas y climáticas similares, con precipitación media anual entre 1000 y 1500 mm año⁻¹, humedad relativa entre 70 y 80% y temperatura entre 20 a 35 °C. Según Holdridge (1978), estas condiciones climáticas corresponden a la zona agroecológica Bosque Seco Tropical (Bs T).

Se evaluaron 242 parcelas, se consideraron cuatro sistemas de uso de la tierra, sistema forestal comercial (15 años)(Forestal), sistemas de praderas con ganadería tradicional (7 a 8 años)(Pr), sistemas Agroforestales con Cacao (4 años) (SAF) y Sistemas silvopastoriles (20 años) (SSP) (Figura 1). El Anexo 1 presenta algunas características fisicoquímicas y biológicas de las áreas de estudios. En términos generales, se evidenció predominio de las unidades de suelo Planosoles éutricos, Ferralsoles órticos y Gleysoles húmicos (IUSS Working Group WRB, 2022) de fertilidad media a alta, con predominio de texturas medias a finas, bien a imperfectamente drenados y pendientes del terreno < 3% (Anexo 1).

Muestreo y Análisis de Suelos

Durante el periodo 2017 a 2021 se realizó el muestreo en 242 predios distribuidos en la región caribe colombiana, bajo diferentes sistemas de producción agropecuarios (18 predios en sistemas de producción forestal comercial, 113 predios con praderas con ganadería tradicional, 75 predios con sistemas silvopastoriles y 36 predios con sistemas agroforestales), sobre los cuales se tomaron muestras disturbadas e indisturbadas de suelo (0 cm - 10 cm y 10 cm - 20 cm de profundidad) para determinar parámetros fisicoquímicos y biológicos de suelo, en cada punto de muestreo seleccionado se construyeron cajuelas de evaluación (30 cm × 30 cm × 30 cm), las cuales se ubicaron en la zona central de cada predio o lote, excluyendo áreas inundables, zonas de acumulación, áreas de poca vegetación, cerca de canales de riego o drenaje, áreas de descanso de animales y establos.

En cada área de evaluación se tomaron muestras de suelo por triplicado, para el caso de este estudio, las muestras de suelo obtenidas en cada profundidad no se analizaron por separado, tomando para el análisis la combinación de las profundidades (0 cm - 20 cm).

Las propiedades químicas de suelo evaluadas fueron: materia orgánica (MO) (Walkley y Black, 1934), fósforo disponible (P) por extracción Bray II modificado y cuantificación por reducción con ácido ascórbico (Bray y Kurtz, 1945), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), azufre (S), sodio (Na) por medio espectrofotometría de absorción y emisión atómica (Chapman, 2016; Hendershot, Lalande y Duquette, 2007), capacidad de intercambio catiónico (CIC), suma de bases de intercambio (IGAC, 2006) y pH (Potenciométrico, relación 1:1 peso volumen⁻¹) (Hendershot *et al.*, 2007).

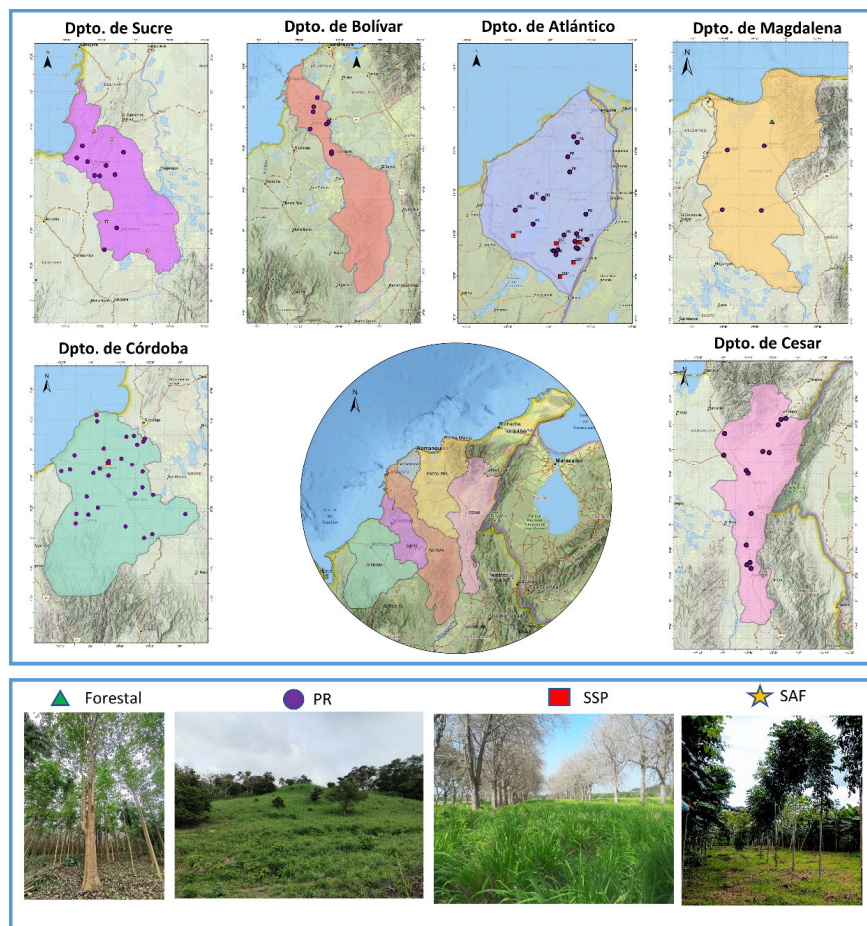


Figura 1. Ubicación de los sitios de muestreo. Sistemas de praderas ganadería tradicional (Pr), sistemas agroforestales con cacao (SAF) y sistemas silvopastoriles (SSP), distribuidos en los departamentos de Atlántico, Bolívar, Cesar, Magdalena, Sucre y Córdoba. Fuente: Elaboración propia.

Figure 1. Location of sampling sites. Traditional livestock grassland systems (Pr), agroforestry systems with cacao (SAF) and silvopastoral systems (SSP), distributed in the departments of Atlántico, Bolívar, Cesar, Magdalena, Sucre, and Córdoba. Source: Own elaboration.

Las propiedades físicas del suelo que contribuyeron al análisis de la información fueron: densidad aparente (Da) con el método del cilindro de volumen conocido (ecuación 1).

$$Da = \frac{M_{ss}}{V_c} \quad (1)$$

Donde M_{ss} = masa de suelo seco (g) a 105 C por 24 h y V_c = volumen del cilindro (cm^3), (Burt, 2014).

Densidad real (Dr) método del picnómetro (IGAC, 2006), porosidad total (Pt) del suelo por la relación entre Da y Dr , descrita por Bernabé y Mainault (2015) (ecuación 2).

$$Pt = \left(1 - \left(\frac{Da}{Dr} \right) \right) \times 100 \quad (2)$$

La resistencia mecánica a la penetración (RMP) se determinó por medio del equipo Penetrologger de la marca Eijkelkamp, distribución de partículas (textura) con el método de Bouyoucos (IGAC, 2006) y el índice de estabilidad estructural (IEE), el cual se calculó utilizando las fórmulas propuestas por Pieri (1995) (ecuación 3).

$$IEE = \frac{\%MO}{(\%Limo + \%Arcilla)} \times 100 \quad (3)$$

Cuadro 1. Valores de referencia físicos, químicos y biológicos para diferentes sistemas de uso del suelo.
Table 1. Physical, chemical, and biological reference values for different land use systems.

Indicador químico							
Indicador	Unidad	LB	V_I	UB	Óptimo	C_P	Referencia
pH	sin unidad	< 5	6.5	> 8	6.5-7.3	Óptima	Osorio-Vega (2014)
MO	g 100g ⁻¹	< 1	2	> 3	44 593	Más es mejor	Arzola y Machado (2015)
CIC	cmol kg ⁻¹	1.1	17.9	38.4	> 20	Más es mejor	ICA, 1992; Roveda, Peñaranda, Ramírez, Baquero y Galindo, 2013; García-Guzmán, Bautista y Bolaños (2019)
P	mg kg ⁻¹	< 5	25	> 45	15-30	Más es mejor	Osorio-Vega (2014)
S	mg kg ⁻¹	< 3	9	> 15	6-12	Óptima	Osorio-Vega (2014)
Ca	cmol kg ⁻¹	< 1	44 621	> 9	3-6	Óptima	Osorio-Vega (2014)
Mg	cmol kg ⁻¹	< 0.5	1.75	> 3	1.5-2.5	Óptima	Osorio-Vega (2014)
K	cmol kg ⁻¹	< 0.05	0.3	> 0.5	0.15-0.3	Óptima	Osorio-Vega (2014)
Na	cmol kg ⁻¹	< 0.5	1.25	> 2	< 0.5	Menos es mejor	Osorio-Vega (2014)
COS	Mg ha ⁻¹	60	-	65	60	Más es mejor	(Contreras-Santos, Martínez y Falla, 2021) Contreras-Santos, Martinez, Raghavan, López y Garrido (2021b)
Indicador Físico							
Da	g cm ⁻³	< 0.7	0.8	> 1.4	< 1.2	Menos es mejor	Burt, (2014)
RMP	Mpa	2	3	5	< 2	Menos es mejor	Arshad, Lowery y Grossman (2015)
Pt	%	20	35	50	> 50	Más es mejor	Cherubin et al. (2016)
A	%	25	39	53	39	Óptima	Burt, (2014)
Ar	%	8	21	34	30	Óptima	Gabriels y Lobo, (2006)
L	%	33	41.5	50	32	Óptima	Burt, (2014) y Fernández-De Andrade, (2014); Pieri, (1995);
IEE	sin unidad	1.1	5.6	17.7	> 9	Más es mejor	Cherubin et al. (2016)
Indicador Biológico							
IDS	adimensional	0-0.5	0.6-0.9	1	1	Más es mejor	Céspedes-Cansino, Rodríguez y Domínguez (2019)
S	adimensional	1.5-2.07	2.07-3.4	3.4-4.5	2.7 - 3.4	Más es mejor	Martínez et al. (2021)
H'	adimensional	0-0.35	0.35-0.75	0.76-1	1	Más es mejor	Barros, Pashanasi, Constantino y Lavelle (2002)
Col	ind m ⁻²	10	25	59	100	Más es mejor	Opinión de expertos
Iso	ind m ⁻²	5	150	733	300	Óptima	Opinión de expertos
Hym	ind m ⁻²	20	200	543	250	Óptima	Opinión de expertos
Haplo	ind m ⁻²	10	30	60	> 60	Más es mejor	Opinión de expertos

MO = materia orgánica; CIC = capacidad de intercambio catiónico; P = fósforo; S = azufre; Ca = calcio; Mg = magnesio; K = potasio; Na = sodio; COS = carbono orgánico acumulado en el suelo; Da = densidad aparente; RMP = resistencia mecánica a la penetración; Pt = porosidad total; A = arena; Ar = arcilla; L = Limo; IEE = índice estabilidad estructural; IDS = índice de dominancia de Simpson; S = riqueza Margalef; H' = índice de diversidad Shannon; Col = coleóptera; Iso = isóptera; Hym = himenoptera; Haplo = haplotaxida LB = umbral inferior; UB = umbral superior; V_I = valor del indicador (media); Óptimo (O) = punto óptimo; C_P = curva de puntuación.

MO = organic matter; CEC = cation exchange capacity; P = phosphorus; S = sulfur; Ca = calcium; Mg = magnesium; K = potassium; Na = sodium; COS = cumulative soil organic carbon; Da = bulk density; RMP = mechanical resistance to penetration; Pt = total porosity; A = sand; Ar = clay; L = silt; IEE = structural stability index; IDS = Simpson's dominance index; S = Margalef richness; H' = Shannon diversity index; Col = coleoptera; Isoptera = isoptera; Hym = hymenoptera; Haplo = haplotaxida LB = lower threshold; UB = upper threshold; V_I = indicator value (mean); Optimum (O) = optimum point; C_P = scoring curve.

Los macroartrópodos del suelo se evaluaron siguiendo la metodología descrita por el Instituto de Biología y Fertilización de Suelos Tropicales TSBF (Anderson y Ingram, 1993), solo los especímenes de macroartrópodos de más de 0.2 cm se conservaron en alcohol al 70%, posteriormente fueron identificados en el laboratorio de entomología del Centro de Investigación Turipaná. Por su parte, los organismos de cuerpo blando como las lombrices (Haplotaxida) fueron contabilizados *in situ* y liberados. Los macroartrópodos se clasificaron teniendo cuenta los órdenes taxonómicos Coleóptera, Haplotaxida, Himenóptera e Isóptera. La abundancia se determinó con el número de individuos por metro cuadrado (ind m^{-2}) y se cuantificó la riqueza - S, índice de diversidad de Shannon -H' (Shannon, 1948) y el índice de dominancia de Simpson - IDS (Simpson, 1949).

Evaluación de la Calidad de Suelo (ICS)

El índice de calidad de suelo se ajustó dependiendo del uso de suelo (forestal comercial, praderas con ganadería tradicional, silvopastoriles y agroforestales). Para tal fin, se siguieron los siguientes pasos claves descritos por Silva-Olaya *et al.* (2022): 1. selección, 2. interpretación y 3. integración de los indicadores de calidad de suelo.

Selección. Se utilizaron 11 variables relacionadas con las propiedades químicas de suelos, siete relacionadas con las propiedades físicas y nueve parámetros biológicos del suelo, teniendo en cuenta su funcionalidad, utilidad e importancia dentro de los procesos que ocurren en el suelo (Cuadro 1). La información de los suelos obtenida se ajustó a una profundidad de 0 a 20 cm. Para iniciar el análisis de la información, se seleccionó el conjunto mínimo de datos (CMD), por medio de un análisis de componentes principales (ACP), lo que permitió elegir variables químicas, físicas y biológicas del suelo con mayor capacidad de explicar los procesos que ocurren en el suelo en los sistemas productivos agropecuarios (González-García *et al.*, 2021; Silva-Olaya *et al.*, 2022).

Los componentes propios retenidos y sometidos al método de rotación ortogonal (varimax) o varianza máxima, fueron aquellos con valores propios superiores a uno (Kaiser, 1960), capaces de simplificar la interpretación de los factores (Martínez-Castro, Kido, Ureña, Zúñiga y Aguilar, 2022). En cada componente se seleccionaron los indicadores con mayor valor absoluto y los que estuvieran 10% por debajo del valor absoluto (Cherubin *et al.*, 2016 y 2015). Se realizó la comprobación de los factores de los componentes a través de análisis de correlación de Pearson ($P < 0.05$); los factores de mayor relevancia y alta correlación fueron seleccionados dentro de cada componente principal (Cherubin *et al.*, 2016; Silva-Olaya *et al.*, 2022).

Interpretación. Luego de obtener el conjunto mínimo de datos (CMD), se realizó la normalización o transformación de los datos mediante ecuaciones homotéticas no lineales, asignando valores de 0 a 1 a los indicadores edáficos (Cherubin *et al.*, 2016; Silva-Olaya *et al.*, 2022). La construcción de las curvas de puntuación se realizó mediante las ecuaciones "más es mejor", "menos es mejor" y "punto medio óptimo" con base a la funcionalidad de los indicadores, soportado en opinión de expertos (Cuadro 1).

Para los criterios "más es mejor" y "menos es mejor" se utilizaron las ecuaciones 4 y 5, respectivamente; para determinar el punto medio óptimo se utilizaron las ecuaciones 6 y 7.

$$\text{Puntuación} = \frac{a}{\left[1 + \left(\frac{\text{LB}-\text{UB}}{\text{X}-\text{UB}}\right)^S\right]} \quad (4)$$

$$\text{Puntuación} = \frac{a}{\left[1 + \left(\frac{\text{B}-\text{LB}}{\text{X}-\text{LB}}\right)^S\right]} \quad (5)$$

$$\text{Puntuación} = \frac{a}{\left[1 + \left(\frac{\text{LB}-\text{O}}{\text{X}-\text{O}}\right)^S\right]} \quad (6)$$

$$\text{Puntuación} = \frac{a}{\left[1 + \left(\frac{\text{UB}-\text{O}}{\text{X}-\text{O}}\right)^S\right]} \quad (7)$$

Donde: a: Puntuación máxima para este caso es 1; B: Valor de referencia (Cuadro 1); LB: Umbral Inferior; UB: Umbral Superior; X: Variable estudiada; O: Óptimo valor de referencia (Cuadro 1); S: Pendiente de la ecuación constante igual a -2.5.

Integración de los indicadores de calidad de suelo. La integración de los indicadores de suelo seleccionados mediante el CMD y el peso del indicador (vector propio) en cada componente principal permiten la construcción de un índice de calidad de suelo (ICS) por medio de un enfoque aditivo ponderado (ecuación 8) (Masto, Chhonkar, Singh y Patra, 2007).

$$ICS = \sum_{i=1}^n (I_s * I_w) \quad (8)$$

Donde, ICS = índice de calidad de suelo; I_s = puntuación del indicador retenido (valor normalizado); I_w = Varianza total explicada por el componente principal (autovalor).

Análisis Estadístico

Mediante un estudio observacional se evaluó el efecto de los diferentes usos de suelo en las variables físicas, químicas y biológicas evaluadas. Para el análisis de la información se consideró un modelo de efectos mixtos (PROC MIXED), con el sistema de uso de suelo como efecto fijo y la localización de las muestras como efectos de control. En caso de incumplimiento de los supuestos del modelo lineal general, se ajustaron modelos generalizados (PROC GLIMMIX) con distribución de residuales apropiada a la naturaleza de la variable. En caso de detectarse diferencia significativa, las medias se separaron empleando la prueba de Tukey con alfa al 0.05. Para la selección del conjunto mínimo de datos se realizó análisis de componentes principales (ACP) a través del procedimiento PROC FACTOR. Las correlaciones se verificaron mediante el análisis de correlación de Pearson (PROC CORR); se utilizó el software Statistical Analysis System - SAS versión 9 (SAS Institute, 2013). para en el análisis de la información.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Propiedades Físicoquímicas y Biológicas del Suelo en Sistemas de Producción Agropecuarios

El análisis de comparación de medidas realizado entre los sistemas de producción agropecuarios mostró diferencias significativas respecto al comportamiento de los indicadores físicos, químicos y biológicos del suelo (Cuadro 2). El mayor valor de D_a en el suelo se presentó en los sistemas forestales ($1.5 \pm 0.05 \text{ g cm}^{-3}$), seguido del sistema de producción de los sistemas silvopastoriles - SSP ($1.49 \pm 0.05 \text{ g cm}^{-3}$) (Cuadro 2). La resistencia mecánica a la penetración de las raíces en el suelo (RMP) presentó el valor más alto en el sistema forestal ($3.17 \pm 0.22 \text{ MPa}$) y la menor RMP en los sistemas agroforestales - SAF ($1.0 \pm 0.27 \text{ MPa}$). Los grupos texturales predominantes fueron el franco (F), con variación de franco arenoso (F-A) en el sistema Forestal a Franco Arcilloso (F-Ar) en los sistemas agroforestales - SAF y sistemas de praderas ganadería tradicional - Pr; y arcillo limosa (Ar-L) en los SSP. El contenido de arena (A) mostró comportamiento similar entre los sistemas en monocultivo Forestal y Pr ($P > 0.05$) y diferencial ($P < 0.0001$) respecto a los sistemas asociados SAF y SSP (Cuadro 2).

El contenido de limos (L) y arcillas (Ar) dentro de los sistemas evaluados, mostró comportamiento diferencial ($P < 0.001$). Así mismo, se observó correlación inversa entre el contenido de arenas (A) y los contenidos de arcillas (Ar) y limos (L); mayor prevalencia de limos y arcillas dentro de SSP y SAF (Cuadro 2). El índice de estabilidad estructural (IEE), mostró comportamiento diferencial ($P < 0.0001$) entre los sistemas de producción agropecuarios evaluados, siendo el sistema forestal (3.92 ± 0.54) donde se encontró el mayor valor del IEE, seguido de la pradera con manejo tradicional - Pr y los sistemas silvopastoriles - SSP (Cuadro 2).

El mayor contenido de MO se registró en los SSP, seguido del sistema forestal y Pr. El contenido de fósforo (P) en el suelo se comportó de forma similar en los sistemas evaluados, reportando mayor contenido dentro de los SAF ($27.05 \pm 22.45 \text{ mg kg}^{-1}$). El contenido promedio de azufre (S) en el suelo dentro de los sistemas fue de $5.77 \pm 1.91 \text{ mg kg}^{-1}$, con variación de $4.01 \pm 0.59 \text{ mg kg}^{-1}$ (Sistema Forestal) a $7.09 \pm 0.98 \text{ mg kg}^{-1}$ (SSP). Las bases de intercambio catiónico, calcio (Ca) y sodio (Na) presentaron comportamiento similar ($P > 0.05$) en los sistemas de producción evaluados. Contrario a esto, los valores de magnesio (Mg) y potasio (K) encontrados en los sistemas evidenciaron diferencias significativas ($P = 0.0112$ y $P = 0.0017$, respectivamente). Los mayores contenidos de Mg y K se registraron en SAF y SSP (Cuadro 2). Por su parte, los mayores valores de CIC se observaron dentro de los sistemas asociados con especies arbóreas o arbustivas (SAF y SSP) (Cuadro 2).

Cuadro 2. Indicadores fisicoquímicos y biológicos del suelo, en diferentes sistemas de producción agropecuarios del Caribe colombiano.
Table 2. Soil physicochemical and biological indicators, in different agricultural production systems in Colombian Caribbean.

Sistemas*					ANAVA		
	Indicadores del Suelo	Forestal	Pr	SAF	SSP	Media	CV
pH	6.38±0.2	6.19±0.11	6.06±0.28	6.25±0.15	6.36	11.38	NS
MO	2.31±0.35 b	2.19±0.28 b	1.22±0.39 c	3.1±0.3 a	2.21	43.23	**
CIC	17.67±3.21 ab	16.68±2.49 a	25.77±3.52 b	23.48±2.71 b	20.9	42.92	**
P	9.97±1.47	10.3±1.46	27.05±22.45	11.26±1.92	14.65	127.95	NS
S	4.01±0.59 b	5.02±1.16 b	6.96±0.91 ab	7.09±0.98 b	5.77	139.33	**
Ca	11.1±1.96	11.3±1.34	11.3±1.58	17.7±3.2	12.7	51.26	NS
Mg	4.8±1.25 ab	4.34±0.89 b	7.44±1.37 ab	5.87±1.09 ab	5.61	60.92	**
K	0.2±0.02 b	0.28±0.03 a	0.38±0.15 a	0.3±0.03 a	0.24	74.38	**
Na	0.27±0.07	0.23±0.04	0.21±0.03	0.2±0.06	0.23	153.89	NS
COS	36.6±4.83 ba	33.7±3.17 a	17.3±6.62 b	41.2±3.85 a	32.2	39.66	**
Da	1.5±0.05 a	1.46±0.04 a	1.24±0.07 b	1.49±0.05 a	1.42	10.58	**
RMP	3.17±0.22 a	2.62±0.17 b	1±0.27 c	2.51±0.19 b	2.33	25.34	**
PT	41.6±2.17	44.4±1.77	46.5±2.84	43.3±1.93	43.95	13.7	NS
A	0.52±0.04 a	0.45±0.02 a	0.25±0.02 b	0.3±0.02 b	0.38	43.98	**
Ar	0.17±0.02 b	0.24±0.01 b	0.39±0.02 a	0.33±0.01 a	0.28	41.12	**
L	0.31±0.02 cb	0.31±0.01 c	0.36±0.02 ab	0.37±0.01 a	0.34	26.15	**
IEE	3.92±0.54 a	3.52±0.34 a	1.94±0.35 b	3.41±0.36 ab	3.2	59.12	*
IDS	0.55±0.03 a	0.64±0.03 a	0.62±0.02 a	0.53±0.03 a	0.59	41.44	NS
S	0.87±0.14 bc	0.81±0.1 c	1.63±0.15 a	1.17±0.13 b	1.12	50.33	**
H	1.25±0.08 bc	1.2±0.05 c	1.81±0.09 a	1.44±0.08 b	1.43	37.5	**
Col	3.96±0.65 b	4.91±0.62 b	0.5±0.13 c	6.34±0.85 a	3.93	135.85	**
Iso	18.2±3.6 b	24.3±4.59 a	10.4±2.07 c	19.5±3.75 b	18.1	188.39	**
Hym	60.44±8.52 a	43.44±5.97 c	4.63±0.71 d	52.62±7.32 b	40.28	116.03	**
Haplo	11.14±1.15 ab	10.52±0.81 b	6.32±0.74 c	13.01±1.12 a	10.25	68.65	**

MO= materia orgánica; CIC = capacidad de intercambio catiónico; P = fósforo; S = azufre; Ca = calcio; Mg = magnesio; K = potasio; Na = sodio; COS = carbono orgánico acumulado en el suelo; Da = densidad aparente; RMP = resistencia mecánica a la penetración; Pt = porosidad total; A = arena; Ar = arcilla; L = limo; IEE = índice de estabilidad estructural; IDS = índice de dominancia de Simpson; S = riqueza de Margalef; H = índice de diversidad de Shannon; Col = coleópteros; Iso = Isoptera; Hym = himenópteros; Haplo = Haplotaxida; Pr = Sistemas de praderas ganadería tradicional; SAF = sistemas agroforestales con cacao; SSP = sistemas silvopastoriles. Nota: Letras iguales en cada línea, indica comportamiento similar entre los sistemas de acuerdo con la prueba de Tukey; ANAVA = análisis de varianza; letras iguales no hay diferencias significativas (NS); * significancia estadística 5%; ** significancia estadística de 1%.

MO = organic matter; CEC = cation exchange capacity; P = phosphorus; S = sulfur; Ca = calcium; Mg = magnesium; K = potassium; Na = sodium; COS = cumulative soil organic carbon; Da = bulk density; RMP = mechanical resistance to penetration; Pt = total porosity; A = sand; Ar = clay; L = silt; IEE = index of structural stability; IDS = Simpson's dominance index; S = Margalef's richness; H = Shannon's diversity index; Col = Coleoptera; Iso = Isoptera; Hym = Hymenoptera; Haplo = Haplotaxida; Pr = traditional livestock pasture systems; SAF = cocoa agroforestry systems; SSP = silvopastoral systems. Note: Equal letters in each line indicate similar behavior between systems according to Tukey's test; ANAVA = analysis of variance; equal letters no significant difference (NS); * statistical significance 5%; ** statistical significance 1%.

Dentro de los SSP y sistema forestal se encontró la mayor acumulación de carbono orgánico en los suelos (COS, 41.2±3.85 Mg C ha⁻¹ y 36.6±4.83 Mg C ha⁻¹, respectivamente), contrario ($P < 0.0001$) a lo observado en SAF, con reducción de más de 45% (Cuadro 2).

Los índices biológicos de suelo evaluados mostraron diferencias ($P < 0.05$) entre los sistemas de producción analizados en este estudio, excepto el índice de dominancia de Simpson (IDS) ($P > 0.05$). Para el caso del índice IDS fue mayor en Pr (0.64±0.03 unidades), seguido del SAF (0.62±0.02 unidades); asimismo, el índice de diversidad de Shannon (H) y riqueza de Margalef (S) mostraron los mayores valores en SSP y SAF, respectivamente (Cuadro 2).

Los órdenes Coleóptera (Col) y Hymenoptera (Hym) (macro artrópodos) presentaron diferencias ($P < 0.0001$) entre los sistemas de producción agropecuarios. La mayor presencia de individuos por metro cuadrado (ind m^{-2}) del orden Col se obtuvo en SSP y SAF (6.34 ± 0.85 ind m^{-2} y 0.5 ± 0.13 ind m^{-2}) (Cuadro 2). El orden Haplotaxida (Haplo) mostró incremento en SSP, y el sistema forestal (13.01 ± 1.12 ind m^{-2} y 11.14 ± 1.15 ind m^{-2}) y, reducción de individuos dentro de los SAF.

Construcción del Índice de Calidad de Suelo (ICS)

Se evaluaron 24 indicadores de calidad del suelo en cada uno de los sistemas de producción agropecuarios, distribuidos en 10 indicadores químicos, siete indicadores físicos y siete biológicos (Cuadro 2). El análisis de componentes principales (ACP) de los indicadores del suelo mostró que solo siete componentes principales (CP) fueron capaces de explicar 71.28% de la varianza total acumulada (Cuadro 3).

Dentro de estos componentes se identificaron los indicadores con mayor peso absoluto (Cuadro 3), el CP-1 explicó 21.48% de la varianza total. Los indicadores con mayor peso absoluto dentro del CP-1 fueron: la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y Calcio (Ca) (Cuadro 3). El CP-2 explicó 14.99% de la varianza de los datos, los indicadores de mayor peso fueron: la RMP y el COS. El CP-3 explicó 10.14%, siendo índice de diversidad de Shannon (H) el de mayor peso. Los otros CP sumados (CP-4 al CP-7) fueron capaces de explicar 24.67% de la varianza (Cuadro 3); donde los auto vectores dominantes fueron: Arena(A) y arcilla (Ar) en el componente (CP-4), Isóptera en el componente (CP-5), el pH (CP-6) y el fósforo (CP-7).

La identificación del CMD fue apoyada con el análisis de correlación de Pearson, donde se seleccionó el indicador de mayor peso dentro de cada componente principal (en los casos que el CP mostrara más de un indicador) se tuvo en cuenta correlación significativa entre sí. De acuerdo a esto, para el CP-1 el indicador seleccionado fue la CIC, con alta correlación significativa positiva con Ca ($r = 0.86$); en el caso del CP-2, se seleccionó la resistencia mecánica a la penetración (RMP), con correlación significativa e inversa con el COS ($r = -0.49$); en el CP-3, se seleccionó el indicador biológico (H); en el CP-4, se seleccionó el contenido de arena (A), con correlación significativa alta inversa con el contenido de arcilla (Ar) ($r = -0.89$); el CP-5 (Iso); el CP-6 (pH) y CP-7 (P).

Índices de Calidad de Suelo (ICS)

El efecto de los cambios en el uso del suelo y la sensibilidad de sus indicadores se reflejan en el valor del ICS de cada uno de los indicadores de suelo (Figura 2). Los resultados mostraron que el índice de calidad de suelo construido a partir del indicador químico de suelo; capacidad de intercambio catiónico (ICS-CIC) fue capaz de aportar entre 34.7 al 41.2% del valor del índice de calidad de suelo total (ICS) en los sistemas de producción agropecuarios evaluados. Se resaltan los sistemas que asocian varias especies (SSP y SAF) con los mayores aportes al ICS desde el ámbito químico de suelo (Figura 2C y 2D). Desde el punto de vista físico y biológico del suelo, se observó comportamiento similar en el índice de calidad de suelo generados por indicador en todos los sistemas, excepto en los sistemas agroforestales - SAF donde se evidenció que el índice de calidad de suelo, construido a partir del indicador de la resistencia mecánica a la penetración (ICS-RMP), fue el de mayor sensibilidad al momento de evaluar los cambios del suelo, seguido del ICS-CIC (Figura 2D).

El índice de calidad de suelo (ICS) obtenido mostró diferencias ($P < 0.0001$) entre los sistemas agropecuarios evaluados. El sistema agroforestal exhibió el mayor valor de ICS (0.77) y los sistemas que incluyen una sola especie (Forestales y la pradera ganadería tradicional - Pr) muestran los menores ICS (Figura 3).

Efecto De Los Sistemas de Producción Agropecuarios sobre la Calidad y Salud del Suelo

En este trabajo, la porosidad total (Pt) del suelo es mayor en los sistemas que incluyen especies arbóreas o arbustivas. Los valores mayores de Pt se observaron en los sistemas silvopastoriles - SSP y agroforestales - SAF y los más bajos en la pradera ganadería tradicional - Pr (Cuadro 2). Esto puede estar asociado a la capacidad de exploración de las raíces de las especies leñosas y a la materia orgánica aportada por la biomasa aérea y subterránea (raíces) al suelo, lo que favorece el movimiento del agua y oxígeno en el perfil de suelo. En este sentido, los cambios en el uso del suelo al migrar de sistemas de producción en monocultivos hacia sistemas más complejos (silvopastoriles, sistemas agroforestales, etc.) contribuyen a la generación de cambios favorables en el suelo (Duran-Bautista, Muñoz, Galindo, Ortiz y Bermúdez, 2020; Singh, Bhardwaj, Pala y Rajput, 2018). Aunque se observó aumento de porosidad total dentro de los sistemas asociados o multiespecies, los resultados obtenidos fueron inferiores a 50% de macroporos libres en todos los sistemas, lo que se asocia a procesos de compactación (Salamanca y Amézquita, 2015).

Cuadro 3. Análisis de componentes principales (ACP) dentro de los sistemas de producción agropecuarios evaluados.
Table 3. Principal Component Analysis (PCA) in the evaluated agricultural production systems.

Componente	CP-1	CP-2	CP-3	CP-4	CP-5	CP-6	CP-7	
Autovalor	5.15	3.60	2.43	2.17	1.59	1.11	1.05	
Varianza (%)	21.48	14.99	10.14	9.03	6.63	4.65	4.36	
Acumulado (%)	21.48	36.46	46.61	55.64	62.27	66.91	71.28	
Indicador suelo	Vector propio							Comunalidad
pH	0.07	0.08	0.04	0.04	0.09	0.83	0.15	0.73
MO	0.64	0.64	-0.10	-0.01	0.12	0.04	-0.15	0.87
CIC	0.84	0.02	0.19	0.01	0.13	-0.08	0.12	0.79
S	0.65	0.19	-0.13	0.19	-0.24	0.12	-0.18	0.61
P	0.09	0.02	-0.02	-0.03	0.00	0.15	0.91	0.85
Ca	-0.77	0.16	-0.03	-0.13	-0.16	-0.10	-0.01	0.68
Mg	0.06	-0.49	-0.14	0.17	0.26	0.51	0.22	0.67
K	0.66	0.30	-0.08	0.05	-0.14	0.15	0.32	0.68
Na	-0.31	0.29	0.38	-0.37	-0.10	0.03	0.09	0.48
Da	0.49	-0.21	0.27	-0.24	0.12	-0.56	0.13	0.76
PT	0.65	0.14	0.12	-0.07	0.06	-0.22	0.03	0.51
RMP	0.09	-0.75	0.24	-0.04	-0.13	-0.14	-0.10	0.68
Arena	-0.06	0.16	0.02	0.89	0.01	0.08	0.08	0.84
Arcilla	0.17	0.01	0.07	0.82	-0.19	0.11	-0.12	0.77
Limo	0.51	-0.15	-0.09	0.35	-0.40	-0.08	0.15	0.60
IEE	0.12	0.62	-0.12	-0.19	0.58	0.19	-0.05	0.83
COS	0.55	0.68	-0.20	0.04	0.13	0.16	-0.15	0.87
IDS	-0.35	-0.14	0.75	0.06	-0.08	0.06	-0.06	0.73
S	0.43	-0.07	0.74	-0.08	-0.18	-0.12	-0.08	0.80
H	0.18	-0.03	0.87	0.12	0.01	-0.07	0.04	0.82
Col	0.19	0.59	0.22	0.25	0.14	-0.31	0.09	0.62
Iso	0.07	0.10	-0.07	-0.08	0.78	0.04	-0.05	0.64
Hym	0.04	0.45	-0.23	0.09	0.58	0.03	0.25	0.67
Haplo	-0.02	0.54	0.25	0.39	0.32	-0.06	0.09	0.62

MO= materia orgánica; CIC = capacidad de intercambio catiónico; P = fósforo; S = azufre; Ca = calcio; Mg = magnesio; K = potasio; Na = sodio; COS = carbono orgánico acumulado en el suelo; Da = densidad aparente; RMP = resistencia mecánica a la penetración; Pt = porosidad total; A= arena; Ar = arcilla; L = limo; IEE = índice de estabilidad estructural; IDS = índice de dominancia de Simpson; S = riqueza de Margalef; H = índice de diversidad de Shannon; Col = coleópteros; Iso = isoptera; hym = himenópteros; Haplo = Haplotáxida. CP = componente. Nota: Los resultados resaltados y subrayados negrilla en el cuadro, referencian los indicadores fisicoquímicos y biológicos de mayor valor absoluto por componente principal.

MO = organic matter; CEC = cation exchange capacity; P = phosphorus; S = sulfur; Ca = calcium; Mg = magnesium; K = potassium; Na = sodium; COS = cumulative soil organic carbon; Da = bulk density; RMP = mechanical resistance to penetration; Pt = total porosity; A = sand; Ar = clay; L = silt; SSI = structural stability index; SDI = Simpson's dominance index; S = Margalef's richness; H = Shannon's diversity index; Col = coleoptera; Iso = isoptera; hym = hymenoptera; Haplo = Haplotaxida. CP = component. Note: The results highlighted and underlined in bold in the table refer to the physicochemical and biological indicators with the highest absolute value per principal component.

El comportamiento de la resistencia mecánica a la penetración (RMP) no evidenció efecto en el uso del suelo, resaltando los sistemas silvopastoriles - SSP (2.51 ± 0.19 MPa), la pradera ganadería tradicional - Pr (2.62 ± 0.17 MPa) y forestales (3.17 ± 0.22 MPa) con valores superiores a 2 MPa, valor restrictivo para el desarrollo de las raíces (Polanía-Hincapié *et al.*, 2021). En el caso de los sistemas de producción ganaderos, se observó reducción de la RMP, cuando se implementó el SSP frente a la pradera ganadería tradicional - Pr; estos valores se asocian a la mayor acumulación de MO (Ávila-Ramírez *et al.*, 2019).

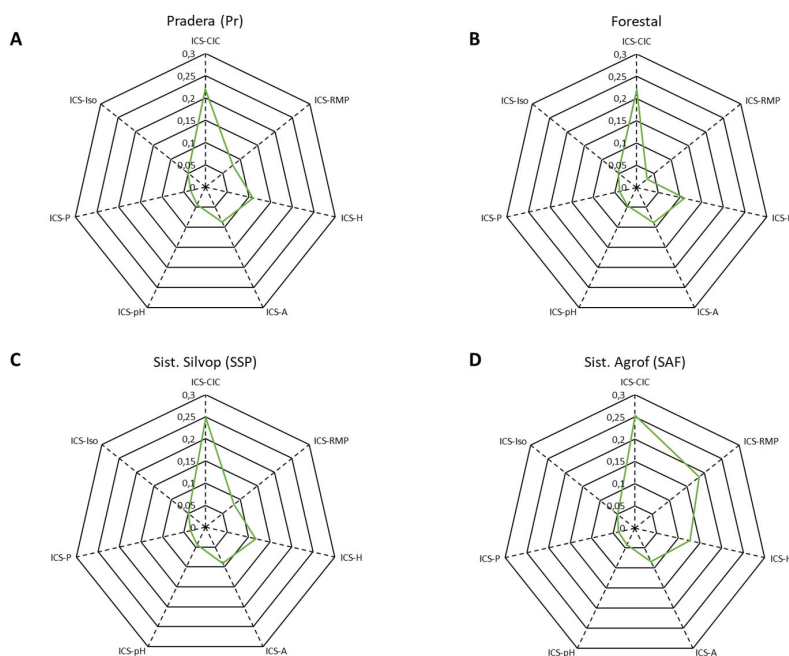


Figura 2. Índices de calidad de suelo seleccionados mediante el CMD en los cuatro sistemas de producción agropecuarios. ICS - CIC: índice de calidad de suelo construido a partir de la capacidad de intercambio catiónico; ICS - RMP: índice de calidad de suelo construido a partir de la resistencia mecánica a la penetración; ICS - H: índice de calidad de suelo construido a partir de la diversidad de Shannon; ICS - A: índice de calidad de suelo construido a partir del porcentaje de arena; ICS - pH: índice de calidad de suelo construido a partir del contenido de hidrogeniones del suelo; ICS - P: índice de calidad de suelo construido a partir del contenido de fósforo disponible en el suelo; ICS - Iso: índice de calidad de suelo construido a partir del número de individuos del orden Isóptera.

Figure 2. Soil quality index selected through the minimum data set (CMD) in the four agricultural production systems. ICS - CIC: soil quality index built from the cation exchange capacity; ICS - RMP: soil quality index built from the mechanical resistance to penetration; ICS - H: soil quality index built from the Shannon diversity; ICS - A: soil quality index built from sand percentage; ICS - pH: soil quality index built from the soil hydrogen ion content; ICS - P: soil quality index built from the phosphorus content available in the soil; ICS - Iso: soil quality index built from the number of individuals of the Isoptera order.

Los resultados obtenidos en este estudio sobre las propiedades físicas de suelo, evidencia procesos de degradación física del suelo bajo los diferentes sistemas de uso empleados (Cuadro 2). Sin embargo, cuando se implementaron sistemas complejos (SAF y SSP), se evidenció mejora en estas condiciones (Cuadro 2); esto se puede asociar a la capacidad que tiene las especies arbóreas y arbustivas de aportar mayor biomasa subterránea (Contreras-Santos *et al.*, 2019), lo que se relaciona al aumento de carbono subterráneo (Morales-Ruiz *et al.*, 2021). Por ende, cuantificar el efecto de los diferentes usos de suelo en función del contenido de materia orgánica y su fase mineral (contenido de arcillas y limos), contribuye a comprender la estructura y erosionabilidad del suelo (Dong *et al.*, 2022).

Los valores más altos del índice de estabilidad estructural (IEE), indicaron mejor estructura del suelo. En este estudio, los sistemas que presentaron los mayores registros de IEE estuvieron asociados a la presencia de especies arbóreas y arbustivas, excepto para el caso de los SAF (Cuadro 2). Este resultado pudo estar asociado a la edad de los sistemas agroforestales (< 5 años). En consecuencia, la implementación de árboles dentro de los sistemas contribuye a evitar los procesos de degradación (físicos, químicos y biológicos) en el suelo (González-Marcillo *et al.*, 2021).

Amplia evidencia científica respalda el papel de las especies arbóreas en los sistemas de producción agropecuarios; con relación con sus numerosos beneficios y servicios ecosistemas ofertados (González-Marcillo *et al.*, 2021; Martínez-Atencia *et al.*, 2020). La presencia de árboles dentro de agroecosistemas favorece la

acumulación de MO (Avendaño-Yáñez, López, Perroni y Pérez, 2018), así como la acumulación de carbono orgánico en suelo, biomasa aérea y subterránea (Oliva *et al.*, 2017). Estos resultados concuerdan con los obtenidos en esta investigación donde se encontró diferencia ($P < 0.05$) entre los sistemas de uso de suelo, respecto a los valores de MO acumulada (Cuadro 2); se destacan los SSP y forestales con los mayores registros de MO del suelo, lo cual se reflejó en el IEE.

En los sistemas asociados con especies arbóreas o arbustivas (SAF y SSP), se observó incremento entre 20 y 30% de los macronutrientes (Ca, Mg, K y Na) frente a los sistemas en monocultivo (Cuadro 2), lo que contribuye a mayor presencia de nutrientes en el suelo, y mayor actividad biológica (Lana, Lana, Lemes, Reis y Moreira, 2018; Vazquez, Teutschero, Lojka, Arango y Pulleman, 2020). Estos resultados concuerdan con otras investigaciones donde se obtuvo aumento de 15% en los macronutrientes bajo sistemas silvopastoriles (Lana *et al.*, 2018). Otros estudios han reportado que la mayor diversidad de especies arbóreas o sistemas mixtos favorecen la mayor disponibilidad de nutrientes en el suelo (Martínez, Cajas, León y Osorio, 2014), así como un mayor número de nichos ecológicos (Liu, Kuchma y Krutovsky, 2018), lo que contribuye a mejorar las condiciones del hábitat o sistema para la actividad biológica (Larjavaara, 2008).

Investigaciones relacionadas con sistemas de producción mixtos o multiespecies (silvopastoriles, agroforestales y silvícolas) atribuyen el aumento del COS a la inclusión de especies arbóreas dentro de los sistemas de producción (Cuadro 2) (López-Santiago *et al.*, 2019; Morales-Ruiz *et al.*, 2021). Basados en estas afirmaciones, la implementación de sistemas de producción mixtos con la inclusión de especies árboles tropicales autóctonas aportan funciones ecosistémicas (económicas, sociales, culturales y ambientales), lo que favorece la formación de suelo, regulan los ciclos de nutrientes y hídrico, y por ende, promueven la acumulación y almacenamiento de carbono (Liu *et al.*, 2018).

Los índices biológicos de suelo (índice de dominancia de Simpson - IDS; índice de diversidad Shannon - H' y riqueza de Margalef - S) evaluados mostraron diferencias ($P < 0.05$) entre los sistemas de producción evaluados. Para el caso de IDS fue mayor en la pradera ganadería tradicional - Pr (0.64 ± 0.03 unidades), congruente con el índice de diversidad de Shannon (H) y riqueza de Margalef (S) que presenta los mayores valores en los sistemas multiespecies (SSP y SAF, respectivamente) (Cuadro 2). Esto puede estar asociado al estado de conservación de cada sistema evaluado, favorecido por la complejidad vegetal ofrecida por los SSP y SAF. Caracterizados por una intensa actividad biológica, vinculada al componente arbóreo con alta deposición de hojarasca, cobertura edáfica permanente, mejor estructura del suelo, importante cantidad de materia orgánica, y mayor protección a los agentes climáticos externos y disponibilidad de agua asociado a su profundo y perenne sistema radical (Caicedo-Rosero, Benavides, Carvajal y Revelo, 2021; Durán y Suárez, 2013; López-Vigoa *et al.*, 2017). Del mismo modo, diversos autores reportan relación positiva entre los índices biológicos y los recursos mencionados (Clapperton, Kanashiro y Behan, 2002; Fraser, Haynes y Williams, 1994; Zerbino, 2010).

Por otro lado, sistemas como la pradera ganadería tradicional - Pr, que poseen estructura vegetal en monocultivo (sin componente arbóreo), presentó disminución en las poblaciones de los diferentes grupos de macroartrópodos, debido a la escasez de nichos (Liu *et al.*, 2018). Lo anterior, repercute en cambios significativos en el perfil del suelo en períodos de tiempo sorprendentemente cortos (Mathieu *et al.*, 2009).

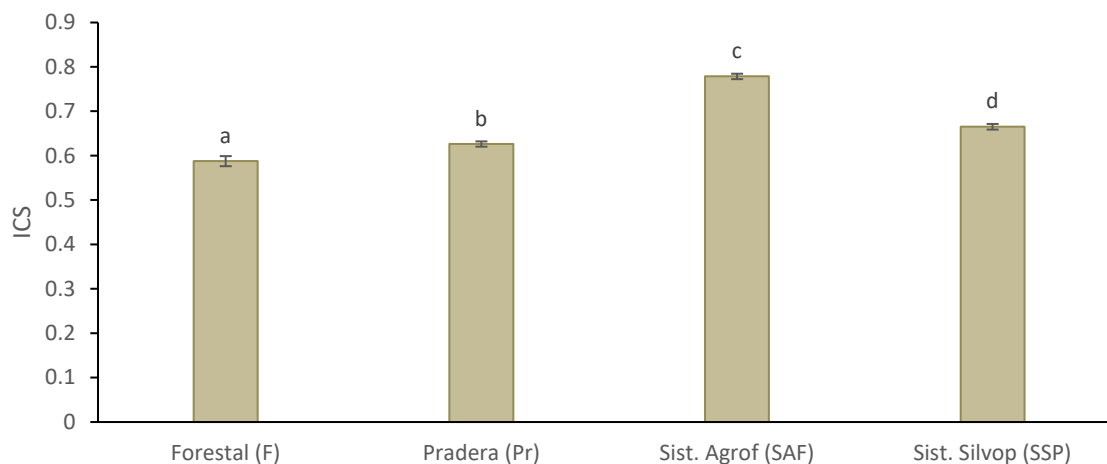


Figura 3. Índices de calidad de suelo en cuatro sistemas de producción agropecuarios en el caribe colombiano.
Figure 3. Soil quality index in four agricultural production systems in the Colombian Caribbean.

Los órdenes Coleóptera (Col) e Hymenoptera (Hym) (macroartrópodos) presentaron diferencias ($P < 0.05$) entre los sistemas de producción agropecuarios. La mayor presencia de individuos por metro cuadrado del orden Coleóptera se evidenció en SSP y Pr. Por su parte, el orden Haplótaxida (Haplo) mostró incremento en SSP y el sistema forestal, lo que evidenció la sensibilidad de estos organismos ante los cambios en el uso del suelo. Del mismo modo, diversos autores reportan relación positiva entre la abundancia de estos organismos y el contenido de COS y N (Clapperton *et al.*, 2002; Fraser *et al.*, 1994; Zerbino, 2010).

Los efectos individuales de los 24 indicadores fisicoquímicos y biológicos de suelo contribuyen a entender los servicios que brindan los sistemas o usos del suelo evaluados con relación al aumento de la fertilidad, mejora del movimiento del agua, presencia de macroartrópodos y contribución en el aumento del COS, así como a identificar los cambios en la salud del suelo inducidos por el manejo inadecuado de los sistemas de producción agropecuarios (Silva-Olaya *et al.*, 2022). Integrar estos indicadores a un índice de calidad de suelo (ICS), permite generar estrategias de manejo en corto, mediano y largo plazo en los sistemas de producción agropecuarios evaluados.

Índice de Calidad del Suelo (ICS) en los Sistemas de Producción Agropecuarios

Los resultados encontrados en esta investigación evidencian la sensibilidad de los diferentes indicadores de suelo en la construcción del ICS, resaltando las contribuciones relativas de cada uno de los indicadores fisicoquímicos y biológicos seleccionados en el ACP (Figura 2). Las propiedades químicas de mayor relevancia fueron la capacidad de intercambio catiónico (CIC), pH y el contenido de fósforo disponible (P) en la construcción del índice de calidad de suelo en diferentes sistemas de uso (Figura 2); resultados similares reportó Gutiérrez, Cardona y Monsalve (2017), donde resaltaron la disponibilidad de nutrientes, contenido de fósforo y de carbono, pH, capacidad de intercambio catiónico, entre otras; con mayor capacidad de explicar los efectos en el cambio de uso del suelo.

En el contexto físico del suelo, el índice también fue sensible a la resistencia mecánica a la penetración (RMP) y contenido de arenas (A) en el suelo como indicadores relacionados con el cambio en el uso del suelo; niveles de compactación, funciones hidrológicas e interacción suelo ambiente, para la capacidad productiva del suelo (Vallejo, Afanador, Hernández y Parra, 2018).

Por su parte, las propiedades biológicas del suelo estuvieron relacionadas con la presencia del orden Isóptera (termitas), siendo este orden asociado a ambientes con alto grado de perturbación, debido a estos individuos (termitas) presenta alta capacidad de adaptación en ambientes disturbados, por lo que la presencia de este orden es considerando como indicador de alteración ambiental (Araújo, Magalhaes, Santos, Nunes y Dias, 2017; Santos, Schossler, Santos, Melo y Santos, 2017).

En el presente estudio la construcción del índice de calidad de suelo (ICS) incorporó algunos de los principales indicadores necesarios para la funcionalidad o salud del suelo (Hernández-Terrón, Gutiérrez, Serrato, González y Rodríguez, 2021; Gutiérrez *et al.*, 2017; Wilson y Sasal, 2017; Sánchez-Navarro *et al.*, 2015). Lo que significa que los indicadores seleccionados durante el proceso de análisis de la información obtenida en los sistemas de producción agropecuarios analizados, contribuyen a explicar las variaciones producto del cambio en los usos de suelo evaluados.

Los sistemas de uso de suelo que presentaron los niveles de alta calidad de suelo ($ICS > 0.7$) fueron los dos sistemas multiespecies (SAF y SSP) (Figura 3) (Barrera-León, Barrezueta y García, 2020; Gong, Ran, He y Tiyip, 2015). Estos sistemas contribuyen a mejorar las propiedades fisicoquímicas (Cherubin, Chavarro y Silva, 2019; Leyva, Baldoquín y Reyes, 2018; Olaya-Montes *et al.*, 2021) y biológicas del suelo (Caicedo-Rosero *et al.*, 2021; Teutscherová *et al.*, 2021). Así como a aumentar su potencial de captura de carbono (López-Santiago *et al.*, 2019). Estos resultados son similares a los reportados en otra investigación donde se evaluó el efecto del cambio del uso del suelo a lo largo del tiempo en sistemas de producción ganaderos, reportando que la implementación de sistemas silvopastoriles o asocio de pasturas con especies arbóreas (Martínez-Atencia *et al.*, 2020) son una estrategia efectiva en la recuperación de la salud del suelo (Olaya-Montes *et al.*, 2021; Silva-Olaya *et al.*, 2022).

CONCLUSIONES

A diferencia de los sistemas en monocultivo, los sistemas de uso de suelo que incluyeron especies arbóreas presentaron los mejores indicadores químicos y biológicos (forestal y PR). Los indicadores capacidad de intercambio catiónico (CIC), resistencia mecánica a la penetración (RMP), contenido de arena (A), orden Isóptera (Iso), pH y contenido de fósforo disponible (P); fueron clave en la construcción de los índices de calidad de

suelo en cada uno de los sistemas de producción analizados. Los resultados de este estudio muestran que la implementación de sistemas silvopastoriles (SSP) y agroforestales (SAF) contribuyen a mejorar la calidad del suelo. Asimismo, se convierten en una estrategia productiva, económica y viable para la toma de decisiones en corto, mediano y largo plazo, asociado a la restauración o rehabilitación del suelo. Es importante mencionar que para futuros estudios relacionados con sistemas multiespecies se hace necesario evaluar el efecto de estas especies (arbóreas y arbustivas) en diferentes estratos de suelo, lo que permitirá comprender mejor sus aportes en la salud y calidad del suelo.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

Se cuenta con el aval de la corporación colombiana de investigación agropecuaria - AGROSAVIA.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los datos originales presentados en el manuscrito se encuentran plasmados en los informes finales de los proyectos de investigación "Estrategias de valoración integral de la cadena de valor para diferenciación del producto cárnico en la región Caribe", "Recomendación técnica para la preparación de suelos con sistemas integrados con el fin de optimizar el establecimiento y renovación de especies forrajeras para caribe seco y húmedo, valles interandinos (renovación dirigida en potreros de pendiente media) y trópico alto", "Sistema de información para monitoreo, evaluación, seguimiento y gestión de plantaciones forestales basado en factores biofísicos, productivos y económico-financieros de plantaciones localizadas en diferentes agroecosistemas de Colombia" financiados por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR) ejecutado por AGROSAVIA.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tiene ningún conflicto con la información plasmada en este documento.

FINANCIACIÓN

Estos proyectos fueron financiados por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia (MADR).

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Construcción de idea principal y documento de artículo, toma de información en campo en diferentes proyectos de investigación, procesamiento de información y análisis estadístico: J.L.C.S. Colaboró en la construcción del documento final del artículo, análisis y procesamiento de la información plasmada en documento: J.M.A. Colaboró en el análisis estadístico y revisión del manuscrito: J.L.R.V. Colaboró en la construcción de manuscrito y apoyo en el análisis estadístico de la información: W.B.H. Colaboró en la construcción del manuscrito, traducción del idioma español inglés, ajustes de forma de documento, toma de información en campo, digitalización de información, procesamiento de información y apoyo en el análisis estadístico de la información: J.G.P. Colaboró en la construcción del manuscrito, toma de información en campo, digitalización de información capturada, análisis de información estadística y ajuste de estilo del documento: C.K.F.G.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - Agrosavia y al Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR) por el financiamiento de la investigación en el marco de los proyectos ("Estrategias de valoración integral de la cadena de valor para diferenciación del producto cárnico en la región Caribe", "Recomendación técnica para la preparación de suelos con sistemas integrados con el fin de optimizar el establecimiento y renovación de especies forrajeras para caribe seco y húmedo, valles interandinos (renovación dirigida en potreros de pendiente media) y trópico alto", "Sistema de información para monitoreo, evaluación, seguimiento y gestión de plantaciones forestales basado en factores biofísicos, productivos y económico-financieros de plantaciones localizadas en diferentes agroecosistemas de Colombia")

LITERATURA CITADA

- Anderson, J. M., & Ingram, J. S. I. (1993). *Tropical soil biology and fertility: A handbook of methods* (2nd Ed.). Wallingford, Oxon, United Kingdom: CAB International. ISBN: 0851988210
- Araújo, A. S. F., Magalhaes, L. B., Santos, V. M., Nunes, L. A. P. L., & Dias, C. T. S. (2017). Biological properties of disturbed and undisturbed Cerrado sensu stricto from Northeast Brazil. *Brazilian Journal of Biology*, 77(1), 16-21. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.06715>
- Arshad, M. A. C., Lowery, B., & Grossman, B. (2015). Physical Tests for Monitoring Soil Quality. In W. J. Doran, & A. J. Jones. (Eds). *Methods for Assessing Soil Quality* (pp. 123-141). Madison, WI, USA: Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub49.c7>
- Arzola-Pina, N., & Machado-de Armas, J. (2015). La aptitud de los suelos para la producción de caña de azúcar. Parte I. Calibración en condiciones experimentales y de producción. *Centro Agrícola*, 42(2), 33-38.
- Avendaño-Yáñez, M. L., López-Ortiz, S., Perroni, Y., & Pérez-Elizalde, S. (2018). Leguminous trees from tropical dry forest generate fertility islands in pastures. *Arid Land Research and Management*, 32(1). <https://doi.org/10.1080/15324982.2017.1377782>
- Ávila-Ramírez, D. N., Lara-Bueno, A., Krishnamurthy, L., Espinosa-Aviña, F., Escutia-Sánchez, J. A., & Uribe-Gómez, M. (2019). Seasonal silvopastoral system with sheep in pine-oak forest: effects on soil and vegetation. *Agroforestry Systems*, 93(5), 1637-1645. <https://doi.org/10.1007/s10457-019-00379-3>
- Barrera-León, J., Barzueeta-Unda, S., & García-Batista, R. M. (2020). Evaluación de los índices de calidad del suelo de diversos cultivos en diferentes condiciones topográficas. *Revista Metropolitana de Ciencias Aplicadas*, 3(1), 182-190.
- Barros, E., Pashanasi, B., Constantino, R., & Lavelle, P. (2002). Effects of land-use system on the soil macrofauna in western Brazilian Amazonia. *Biology and Fertility of Soils*, 35(5), 338-347. <https://doi.org/10.1007/s00374-002-0479-z>
- Bedolla-Rivera, H. I., Negrete-Rodríguez, M. L. X., Medina-Herrera, M. D. R., Gámez-Vázquez, F. P., Álvarez-Bernal, D., Samaniego-Hernández, M., ... & Conde-Barajas, E. (2020). Development of a soil quality index for soils under different agricultural management conditions in the central lowlands of Mexico: Physicochemical, biological and ecophysiological indicators. *Sustainability*, 12(22), 1-24. <https://doi.org/10.3390/su12229754>
- Bernabé, Y., & Mainault, A. (2015). Physics of Porous Media: Fluid Flow Through Porous Media. In *Treatise on Geophysics* (pp. 19-41). Amsterdam, The Netherlands: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53802-4.00188-3>
- Bray, R. H., & Kurtz, L. T. (1945). Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. *Soil Science*, 59(1), 39-46. <https://doi.org/10.1097/00010694-194501000-00006>
- Burt, R. (2014). *Soil Survey Field and Laboratory Methods Manual Soil Survey Investigations Report No. 51*. Washington D.C., USA: USDA.
- Castro, H., & Gómez, M. (2010). Fertilidad de suelos y Fertilizantes. En: Mojica, & Burbano (Eds.). *Ciencia del suelo. Principios Básicos* (pp. 217-303). Bogotá, Colombia: Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo-Guadalupe S.A.
- Céspedes-Cansino, J. L., Rodríguez-Jiménez, M., & Domínguez-Estévez, M. R. (2019). Diversidad de especies vegetales en seis fincas del municipio Minas, Camagüey, Cuba. *Agrisost*, 25(1), 1-10.
- Chapman, H. D. (2016). Cation-exchange capacity. In A. G. Norman (Ed.). *Methods of Soil Analysis, Part 2: Chemical and Microbiological Properties* (pp. 891-901). Madison, WI, USA: American Society of Agronomy-Crop Science Society of America-Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.c6>
- Chará, J., Camargo, J. C., Calle, Z., Bueno, L., Murgueitio, E., Arias, L. M., ... & Molina, E. J. (2015). Servicios ambientales de sistemas silvopastoriles intensivos: mejoramiento del suelo y restauración ecológica. In F. Montagnini, E. Somarriba, E. Murgueitio, H. Fassola, & B. Eibl (Eds.). *Sistemas agroforestales: Funciones productivas, socioeconómicas y ambientales* (pp. 331-348). Cali, Colombia: CIPAV-CATIE. ISBN: 978-958-9386-74-3
- Cherubin, M. R., Karlen, D. L., Cerri, C. E., Franco, A. L., Tormena, C. A., Davies, C. A., & Cerri, C. C. (2016). Soil quality indexing strategies for evaluating sugarcane expansion in Brazil. *PLoS ONE*, 11(3). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0150860>
- Cherubin, M. R., Chavarro-Bermeo, J. P., & Silva-Olaya, A. M. (2019). Agroforestry systems improve soil physical quality in northwestern Colombian Amazon. *Agroforestry Systems*, 93(5), 1741-1753. <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0282-y>
- Cherubin, M. R., Franco, A. L. C., Cerri, C. E. P., da Silva Oliveira, D. M., Davies, C. A., & Cerri, C. C. (2015). Sugarcane expansion in Brazilian tropical soils-Effects of land use change on soil chemical attributes. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 211, 173-184. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.06.006>
- Clapperton, M. J., Kanashiro, D. A., & Behan-Pelletier, V. M. (2002). Changes in abundance and diversity of microarthropods associated with Fescue Prairie grazing regimes. *Pedobiologia*, 46(5), 496-511. <https://doi.org/10.1078/0031-4056-00155>
- Contreras-Santos, J. L., Martínez-Atencia, J., & Falla-Guzmán, C. K. (2021a). Carbono acumulado en raíces de especies vegetales en sistemas silvopastoriles en el Norte de Colombia. *Revista de Ciencias Ambientales*, 55(1), 52-69. <https://doi.org/10.15359/rca.55-1.3>
- Contreras-Santos, J. L., Martínez-Atencia, J., Raghavan, B., López-Rebolledo, L., & Garrido-Pineda, J. (2021b). Sistemas silvopastoriles: mitigación de gases de efecto invernadero, bosque seco tropical - Colombia. *Agronomía Mesoamericana*, 32(3), 901-919. <https://doi.org/10.15517/am.v32i3.43313>
- Contreras-Santos, J. L., Martínez-Atencia, J., Cadena-Torres, J., & Fallas-Guzmán, C. K. (2019). 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>
- Caicedo-Rosero, D., Benavides-Rosales, H., Carvajal-Pérez, L., & Revelo-Salgado, G. (2021). Análisis de las poblaciones edáficas en suelos con sistemas silvopastoriles dedicados a la producción lechera, en la finca San Vicente, El Carmelo, Ecuador. *Revista Criterios*, 28(2), 185-194. <https://doi.org/10.31948/rev.criterios/28.2-art12>
- Dong, L., Li, J., Zhang, Y., Bing, M., Liu, Y., Wu, J., ... & Deng, L. (2022). Effects of vegetation restoration types on soil nutrients and soil erodibility regulated by slope positions on the Loess Plateau. *Journal of Environmental Management*, 302, 113985. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113985>
- Duran-Bautista, E. H., Muñoz-Chilatra, Y., Galindo, J. D., Ortiz, T. A., & Bermúdez, M. F. (2020). Soil Physical Quality and Relationship to Changes in Termite Community in Northwestern Colombian Amazon. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 8, 1-13. <https://doi.org/10.3389/fevo.2020.598134>
- Durán, H., & Suárez, J. (2013). Fauna del suelo y hojarasca en arreglos agroforestales de la Amazonia Colombiana. *Momentos de Ciencia*, 10(1), 10-13.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2015). *Estado Mundial del Recurso Suelo (EMRS) - Resumen Técnico*. Roma, Italia: FAO. ISBN: 978-92-5-308960-4
- Fernández-De Andrade, L. (2014). Aplicación del índice de estabilidad estructural de Pieri (1995) a suelos montañosos de Venezuela. *Terra*, 30(48), 143-153.

- Fraser, P. M., Haynes, R. J., & Williams, P. H. (1994). Effects of pasture improvement and intensive cultivation on microbial biomass, enzyme activities, and composition and size of earthworm populations. *Biology and Fertility of Soils*, 17(3). <https://doi.org/10.1007/BF00336320>
- Fu, B., Zhang, L., Xu, Z., Zhao, Y., Wei, Y., & Skinner, D. (2015). Ecosystem services in changing land use. *Journal of Soils and Sediments*, 15(4), 833-843. <https://doi.org/10.1007/s11368-015-1082-x>
- Gabriels, D., & Lobo, D. (2006). Métodos para determinar granulometría y densidad aparente del suelo. *Venezuelos*, 14(1), 37-48.
- García-Guzmán, S. D., Bautista-Montalegre, L. G., & Bolaños-Benavides, M. M. (2019). Diagnóstico de la fertilidad de los suelos de cuatro municipios de Cundinamarca (Colombia) para la producción de plátano. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 22(1). <https://doi.org/10.31910/rudca.v22.n1.2019.1192>
- Gomez, F., von Müller, A., Tarabini, M., & La Manna, L. (2022). Resilient Andisols under silvopastoral systems. *Geoderma*, 418, 115843. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115843>
- Gong, L., Ran, Q., He, G., & Tiyip, T. (2015). A soil quality assessment under different land use types in Keriya river basin, Southern Xinjiang, China. *Soil and Tillage Research*, 146, 223-229. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.11.001>
- González-García, H., González-Pedraza, A. F., Rodríguez-Yzquierdo, G., León-Pacheco, R., & Betancourt-Vásquez, M. (2021). Vigor en plantas de plátano (*Musa AAB* cv. Hartón) y su relación con características físicas, químicas y biológicas del suelo. *Agronomía Costarricense*, 45(2), 115-134. <https://doi.org/10.15517/rac.v45i2.47772>
- González-Marcillo, R. L., Castro-Guamán, W. E., Guerrero-Pincay, A. E., Vera-Zambrano, P. A., Ortiz-Naveda, N. R., & Guamán-Rivera, S. A. (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>
- Gutiérrez-Rua, J., Posada-García, M. D., & González-Pérez, M. A. (2019). Prácticas de recursos humanos que impactan la estrategia de sostenibilidad ambiental. *Innovar*, 29(73), 11-24. <https://doi.org/10.15446/innovar.v29n73.78008>
- Gutiérrez, J. S., Cardona, W. A., & Monsalve, O. I. (2017). Potencial en el uso de las propiedades químicas como indicadores de calidad de suelo. Una revisión. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 11(2), 450-458. <https://doi.org/10.17584/rcch.2017v11i2.5719>
- Hendershot, W., Lalonde, H., & Duquette, M. (2007). Ion Exchange and Exchangeable Cations. In M. R. Carter, & E. G. Gregorich (Eds.). *Soil Sampling and Methods of Analysis* (10 pp.). Boca Raton, FL, USA: CRC Press.
- Hernández-Terrón, J. J., Gutiérrez-Rodríguez, F., Serrato-Cuevas, R., González-Huerta, A., & Rodríguez-García, E. G. (2021). Manejo nutricional integrado: herramienta clave para la agricultura sostenible. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(5), 885-897. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i5.2290>
- Holdridge, L. R. (1978). *Ecología basada en zonas de vida*. San José, Costa Rica: IICA.
- ICA (Instituto Colombiano Agropecuario). (1992). *Fertilización en diversos cultivos: Quinta aproximación*. Bogotá, Colombia: ICA.
- IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). (2006). *Métodos analíticos del laboratorio de suelos*. Bogotá, Colombia: IGAC.
- IUSS Working Group WRB (2022). *International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps, International Union of Soil Sciences*. Vienna, Austria: World Reference Base for soil resources. https://www.isric.org/sites/default/files/WRB_fourth_edition_2022-12-18.pdf
- Kaiser, H. F. (1960). The Application of Electronic Computers to Factor Analysis. *Educational and Psychological Measurement*, 20(1). <https://doi.org/10.1177/001316446002000116>
- Karlen, D. L., Mausbach, M. J., Doran, J. W., Cline, R. G., Harris, R. F., & Schuman, G. E. (1997). Soil Quality: A Concept, Definition, and Framework for Evaluation (A Guest Editorial). *Soil Science Society of America Journal*, 61(1). <https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100010001x>
- Lana, Á. M. Q., Lana, R. M. Q., Lemes, E. M., Reis, G. L., & Moreira, G. H. F. A. (2018). Influence of native or exotic trees on soil fertility in decades of silvopastoral system at the Brazilian savannah biome. *Agroforestry Systems*, 92(2). <https://doi.org/10.1007/s10457-016-9998-8>
- Larjavaara, M. (2008). A Review on Benefits and Disadvantages of Tree Diversity. *The Open Forest Science Journal*, 1(1), 24-26. <https://doi.org/10.2174/1874398600801010024>
- Leyva, S. L., Baldoquín, A., & Reyes, M. (2018). Propiedades de los suelos en diferentes usos agropecuarios, Las Tunas, Cuba. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 35(1). <https://doi.org/10.22267/rcia.183501.81>
- Li, K., Wang, C., Zhang, H., Zhang, J., Jiang, R., Feng, G., ... & Yu, B. (2022). Evaluating the effects of agricultural inputs on the soil quality of smallholdings using improved indices. *Catena*, 209, 105838. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105838>
- Liu, C. L. C., Kuchma, O., & Krutovsky, K. V. (2018). Mixed-species versus monocultures in plantation forestry: Development, benefits, ecosystem services and perspectives for the future. *Global Ecology and Conservation*, 15, e00419. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2018.e00419>
- López-Santiago, J. G., Casanova-Lugo, F., Villanueva-López, G., Díaz-Echeverría, V. F., Solorio-Sánchez, F. J., Martínez-Zurimendi, P., ... & Chay-Canul, A. J. (2019). Carbon storage in a silvopastoral system compared to that in a deciduous dry forest in Michoacán, Mexico. *Agroforestry Systems*, 93(1), 199-211. <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0259-x>
- López-Vigoo, O., Sánchez-Santana, T., Iglesias-Gómez, J. M., Lamela-López, L., Soca-Pérez, M., Arece-García, J., & Milera-Rodríguez, M. D. L. C. (2017). Los sistemas silvopastoriles como alternativa para la producción animal sostenible en el contexto actual de la ganadería tropical. *Pastos y forrajes*, 40(2), 83-95.
- Martínez-Atencia, J., Loaiza-Usuga, J. C., Osorio-Vega, N. W., Correa-Londoño, G., & Casamitjana-Causa, M. (2020). Leaf Litter Decomposition in Diverse Silvopastoral Systems in a Neotropical Environment. *Journal of Sustainable Forestry*, 39(7), 710-729. <https://doi.org/10.1080/10549811.2020.1723112>
- Martínez-Castro, C. J., Kido-Cruz, M. T., Ureña-Castillo, F. D., Zúñiga-Marroquín, T., & Aguilar-Martínez, C. U. (2022). Indicadores indirectos de bienestar bovino en el municipio de Loma Bonita, Oaxaca, México. *Revista de Investigaciones Veterinarias Del Perú*, 33(1). <https://doi.org/10.15381/rivep.v33i1.20218>
- Martínez, M. A., Baños, H. L., Cuellar, L., del Toro, M., Sánchez, A., Miranda, I., & Duarte, L. (2021). Diversidad y grupos funcionales de artrópodos en pimiento (*Capsicum annum* L.) a campo abierto y casas de cultivo. *Revista de Protección Vegetal*, 36(1), 1-9.
- Martínez, J., Cajas, Y. S., León, J. D., & Osorio, N. W. (2014). Silvopastoral systems enhance soil quality in grasslands of Colombia. *Applied and Environmental Soil Science*, 2014, 1-9. <https://doi.org/10.1155/2014/359736>
- Margalef, R. (1978). *Perspectivas de la teoría ecológica*. Barcelona, España: Blume. ISBN: 84-7031-099-2
- Masto, R. E., Chhonkar, P. K., Singh, D., & Patra, A. K. (2007). Alternative soil quality indices for evaluating the effect of intensive cropping, fertilisation and manuring for 31 years in the semi-arid soils of India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 136(1-3), 419-435. <https://doi.org/10.1007/s10661-007-9697-z>
- Mathieu, J., Grimaldi, M., Jouquet, P., Rouland, C., Lavelle, P., Desjardins, T., & Rossi, J. P. (2009). Spatial patterns of grasses influence soil macrofauna biodiversity in Amazonian pastures. *Soil Biology and Biochemistry*, 41(3), 586-593. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.12.020>

- Morales-Ruiz, D. E., Aryal, D. R., Pinto-Ruiz, R., Guevara-Hernández, F., Casanova-Lugo, F., & Villanueva-López, G. (2021). Carbon contents and fine root production in tropical silvopastoral systems. *Land Degradation and Development*, 32(2). <https://doi.org/10.1002/ldr.3761>
- Olaya-Montes, A., Llanos-Cabrera, M. P., Cherubin, M. R., Herrera-Valencia, W., Ortiz-Moreno, F. A., & Silva-Olaya, A. M. (2021). Restoring soil carbon and chemical properties through silvopastoral adoption in the Colombian Amazon region. *Land Degradation & Development*, 32(13), 3720-3730. <https://doi.org/10.1002/ldr.3832>
- Oliva, M., Culqui-Mirano, L., Leiva, S., Collazos, R., Salas, R., Vásquez, H., & Maicel- Quintana, J. L. (2017). Reserve of carbon in a silvopastoral system composed of *Pinus patula* and native herbaceous. *Scientia Agropecuaria*, 8(2). <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2017.02.07>
- ONU (Organización de Naciones Unidas). (2015). Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. En Asamblea General. Consultado el 17 de febrero, 2023, Desde <https://sustainabledevelopment.un.org/hlpf>
- Osorio-Vega, N. W. (2014). *Manejo de Nutrientes en Suelos del Trópico*. Medellín, Colombia: Editorial L. Vieco. ISBN: 10958-44-9746-4.
- Paredes-Chacín, A. J., Lopez-Orozco, G. M., & Cajigas-Romero, M. (2019). Prácticas de sostenibilidad: Retos de la cooperación entre regiones latinoamericanas. *Revista de Ciencias Sociales*, 25(1), 25-41. <https://doi.org/10.31876/rcs.v25i1.29594>
- Pieri, C. (1995). Long-term soil management experiments in semi-arid Francophone Africa. In: R. Lal, & B. Steward (Eds.). *Soil Management: experimental basis for sustainability and environmental quality* (pp. 225-266). Boca Raton, FL, USA: CRC Press.
- Polanía-Hincapié, K. L., Olaya-Montes, A., Cherubin, M. R., Herrera-Valencia, W., Ortiz-Moreno, F. A., & Silva-Olaya, A. M. (2021). Soil physical quality responses to silvopastoral implementation in Colombian Amazon. *Geoderma*, 386, 114900. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114900>
- Roveda, G., Peñaranda, A., Ramírez, M., Baquero, I., & Galindo, R. (2013). Diagnóstico de la fertilidad química de los suelos de los municipios de Granada y Silvanía para la producción de uchuva en Cundinamarca. *Ciencia & Tecnología Agropecuaria*, 13(2), 179-188. https://doi.org/10.21930/rcta.vol13_num2_art:253
- Salamanca-Jiménez, A., & Amézquita-Collazos, E. (2015). Influencia de la intensidad de uso sobre algunas propiedades físicas en un suelo del Valle del Cauca, Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 6(1), 43-51. <https://doi.org/10.22490/21456453.1262>
- Sampaio-Torrens, J. C. (2020). Políticas públicas de desarrollo territorial rural: Instrumentos para enfrentar la crisis. *Eutopía. Revista de Desarrollo Económico Territorial*, 18, 11-28. <https://doi.org/10.17141/eutopia.18.2020.4663>
- Sánchez-Navarro, A., Gil-Vázquez, J. M., Delgado-Iniesta, M. J., Marín-Sanleandro, P., Blanco-Bernardeau, A., & Ortiz-Silla, R. (2015). Establishing an index and identification of limiting parameters for characterizing soil quality in Mediterranean ecosystems. *CATENA*, 131, 35-45. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.02.023>
- Santos, D. P., Schossler, T. R., Santos, I. L., Melo, N. B., & Santos, G. G. (2017). Soil macrofauna in a Cerrado/Caatinga ecotone under different crops in Southwestern Piauí State, Brazil. *Ciência Rural*, 47(10), 1-9. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20160937>
- Sarmiento-Reyes, E., Fandiño-Zabala, S. A., & Gómez-Echeverri, L. F. (2018). Índices de calidad del suelo. Una revisión sistemática. *Ecosistemas*, 27(3), 130-139.
- SAS Institute. (2013). *Statistical Analysis System SAS/STAT User's Guide. version 9*. Cary, NC, USA: SAS Institute Inc.
- Shannon, C. E. (1948). A Mathematical Theory of Communication. *The Bell System Technical Journal*, 27(3), 379-423. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>
- Silva-Olaya, A. M., Olaya-Montes, A., Polanía-Hincapié, K. L., Cherubin, M. R., Duran-Bautista, E. H., & Ortiz-Moreno, F. A. (2022). Silvopastoral systems enhance soil health in the amazon region. *Sustainability*, 14(1), 1-18. <https://doi.org/10.3390/su14010320>
- Simpson, E. H. (1949). Measurement of diversity. *Nature*, 163, 688. <https://doi.org/10.1038/163688a0>
- Singh, R., Bhardwaj, D. R., Pala, N. A., & Rajput, B. S. (2018). Variation in soil properties under different land uses and altitudinal gradients in soils of the Indian Himalayas. *Acta Ecologica Sinica*, 38(4), 302-308. <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2017.12.003>
- Tamayo-Ortiz, C. V., & Alegre-Orihuela, J. C. (2022). Asociación de cultivos, alternativa para el desarrollo de una agricultura sustentable. *Siembra*, 9(1). <https://doi.org/10.29166/siembra.v9i1.3287>
- Teutscheroová, N., Vázquez, E., Sotelo, M., Villegas, D., Velásquez, N., Baquero, D., ... & Arango, J. (2021). Intensive short-duration rotational grazing is associated with improved soil quality within one year after establishment in Colombia. *Applied Soil Ecology*, 159, 103835. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103835>
- Vallejo-Quintero, V. E. (2013). Importancia y utilidad de la evaluación de la calidad de suelos mediante el componente microbiano: experiencias en sistemas silvopastoriles. *Colombia Forestal*, 16(1), 83-99.
- Vallejo, V. E., Afanador, L. N., Hernández, M. A., & Parra, D. C. (2018). Efecto de la implementación de diferentes sistemas agrícolas sobre la calidad del suelo en el municipio de Cachipay, Cundinamarca, Colombia. *Bioagro*, 30(1), 27-38
- Vazquez, E., Teutscheroová, N., Lojka, B., Arango, J., & Pulleman, M. (2020). Pasture diversification affects soil macrofauna and soil biophysical properties in tropical (silvo)pastoral systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 302, 107083. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107083>
- Velasquez, E., & Lavelle, P. (2019). Soil macrofauna as an indicator for evaluating soil based ecosystem services in agricultural landscapes. *Acta Oecologica*, 100, 103446. <https://doi.org/10.1016/j.actao.2019.103446>
- Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1), 29-38. <https://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>
- Wilson, M. G., & Sasal, M. C. (2017). Aplicación de ICS para el monitoreo agroambiental. In: M. G. Wilson (Ed.). *Manual de indicadores de calidad del suelo para las ecorregiones de Argentina* (pp. 23-27). Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. ISBN: 978-987-521-826-0
- Zerbino, M. S. (2010). Evaluación de la macrofauna del suelo en rotaciones cultivos-pasturas con laboreo convencional. *Acta Zoológica Mexicana*, 26(2), 189-202. <https://doi.org/10.21829/azm.2010.262887>

Anexo 1. Valores promedios de las características fisicoquímicas y biológicas de suelo del área de estudio.
Annex 1. Average values of the physicochemical and biological characteristics of the soil in the study area.

Indicadores	Unidades	Departamentos												
		Atlántico		Bolívar		Cesar		Córdoba		Magdalena		Sucre		
		Valor	Interp.	Valor	Interp.	Valor	Interp.	Valor	Interp.	Valor	Interp.	Valor	Interp.	
Químicos	MO	%	1.82	M	2.74	M	1.68	M	3.18	A	2.16	M	1.86	M
	S	mg kg ⁻¹	28.95	A	7.56	B	4.95	B	26.16	A	27.48	A	4.78	B
	P	mg kg ⁻¹	30.87	M	66.15	A	37.21	M	18.98	B	33.64	M	40.61	M
	CIC	cmol kg ⁻¹	19.69	M	24.27	A	7.56	B	24.15	A	14.98	M	26.84	A
	pH		6.63	N	6.47	LA	6.31	LA	5.95	MA	6.01	LA	6.07	LA
	Ca	cmol kg ⁻¹	12.66	A	16.56	A	6.00	A	12.25	A	10.14	A	18.33	A
	Mg	cmol kg ⁻¹	4.90	A	6.57	A	1.22	M	10.25	A	3.77	A	7.53	A
	K	cmol kg ⁻¹	0.61	A	0.72	A	0.21	B	0.74	A	0.28	B	0.61	A
	Na	cmol kg ⁻¹	1.51	A	0.41	M	0.13	M	0.32	M	0.76	A	0.21	M
Físicos	Da	gr cm ⁻³	1.50	Nc	1.40	I	1.69	C	1.35	Nc	1.39	I	1.30	Nc
	RMP	MPa	2.19	R	2.99	AR	2.76	AR	2.39	R	3.09	AR	1.71	NR
	PT	%	41.08	B	46.09	M	35.57	B	48.11	M	47.77	M	45.91	B
	Arena	%	40.70		48.34		55.14		33.70		55.00		33.35	
	Arcilla	%	26.66		19.91		16.13		30.85		16.54		32.80	
	Limo	%	32.45		31.74		28.73		35.14		28.46		33.85	
	Textura		F		F		F-A		F-Ar		F-A		F-Ar	
	IEE		3.53	D	6.27	AD	4.08	D	4.92	D	6.41	AD	3.41	D
	C		0.54	M	0.61	M	0.66	MA	0.60	M	0.64	MA	0.60	M
Biológicos	S		0.78	B	1.05	B	0.64	B	1.32	B	0.86	B	1.32	B
	H		1.20	B	1.36	B	1.19	B	1.36	B	1.26	B	1.63	M

MO = materia orgánica; CIC = capacidad de intercambio catiónico; P = fósforo; S = azufre; Ca = calcio; Mg = magnesio; K = Potasio; Na = sodio; COS = carbono orgánico acumulado en el suelo; Da = densidad aparente; RMP = resistencia mecánica a la penetración; Pt = porosidad total; A = arena; Ar = arcilla; L = limo; IEE = índice estabilidad estructural; C = índice de dominancia de Simpson; S = riqueza Margalef; H' = índice de diversidad Shannon; Interp. = interpretación; N = neutro; LA = ligeramente ácido; MA = moderadamente ácido; A = alto; MA = medio alto; M = medio; B = bajo; Nc = no compact; I = ideal; C = compacto; R = restrictivo; AR = altamente restrictivo; NR = no restrictivo; D = degradado; AD = alto riesgo de degradación. Nota. Interpretación resultados química de suelo: N = neutro; LA = ligeramente ácido; MA = moderadamente ácido; A = alto; M = medio; B = bajo (ICA, 1992; Castro y Gómez, 2010); Interpretación resultados físicos de suelo: Nc = no compact; I = ideal; C = compacto; R = restrictivo; AR = altamente restrictivo; NR = no restrictivo; B = bajo; M = medio; A = alto; D = degradado; AD = alto riesgo de degradación; (Burt, 2014; Pieri, 1995; Salamanca y Amézquita, 2015; Bernabé y Mainault, 2015); Interpretación resultados biológicos de suelo: A = alto; MA = medio alto; M = medio; B = bajo (Shannon, 1948; Simpson, 1949; Margalef, 1978).

MO = organic matter; CEC = cation exchange capacity; P = phosphorus; S = sulfur; Ca = calcium; Mg = magnesium; K = potassium; Na = sodium; COS = soil organic carbon; Da = bulk density; RMP = mechanical resistance to penetration; Pt = total porosity; A = sand; Ar = clay; L = silt; IEE = structural stability index; C = Simpson's dominance index; S = Margalef richness; H' = Shannon diversity index; Interp. = interpretation; N = neutral; LA = slightly acidic; MA = moderately acidic; A = high; MA = medium high; M = medium; B = low; Nc = not compact; I = ideal; C = compact; R = restrictive; AR = highly restrictive; NR = nonrestrictive; D = degraded; AD = high risk of degradation. Note. Interpretation of soil chemistry results: N = neutral; LA = slightly acid; MA = moderately acid; A = high; M = medium; B = low (ICA, 1992; Castro and Gómez, 2010); Interpretation of soil physical results: Nc = not compact; I = ideal; C = compact; R = restrictive; AR = highly restrictive; NR = non-restrictive; B = low; M = medium; A = high; D = degraded; AD = high risk of degradation; (Burt, 2014; Pieri, 1995; Salamanca and Amézquita, 2015; Bernabé and Mainault, 2015); Soil biological results interpretation: A = high; MA = medium high; M = medium; B = low (Shannon, 1948; Simpson, 1949; Margalef, 1978).