

CARACTERIZACIÓN DE SISTEMAS GANADEROS DEL CARIBE SECO PARA CUANTIFICACIÓN DE ÍNDICES DE CALIDAD DE SUELO*

José Luis Contreras-Santos^{1/**}, Judith Martínez-Atencia², Cindy Katherine Falla-Guzmán³,
Jeyson Fernando Garrido-Pineda⁴, José Luis Rodríguez-Vitola⁵

Palabras clave: Propiedades físico-químicas suelo; degradación de suelo; fertilidad de suelo; calidad de suelo; sistemas de ganadería bovina.

Keywords: Physical-chemical properties of soil; soil degradation; soil fertility; soil quality; bovine livestock systems.

Recibido: 26/01/2021

Aceptado: 24/03/2021

RESUMEN

Introducción. Los procesos de degradación del suelo están asociados principalmente a malas prácticas y cambios en su uso. Generar indicadores que permitan conocer el estado del suelo es necesario para buscar alternativas que permitan mejorar la calidad del suelo. **Objetivo.** Evaluar algunos indicadores edáficos en diferentes sistemas de ganadería bovina tradicionales en el Caribe Colombiano. **Materiales y métodos.** Se colectaron muestras de suelo de 72 fincas por triplicado, para un total de 216 muestras, distribuidas en los 6 departamentos (Córdoba, Sucre, Bolívar, Atlántico, Cesar y Magdalena). Se evaluaron propiedades físicas y químicas del suelo con el fin de identificar los principales indicadores y construir los índices de calidad de suelo. **Resultados.** Se evidenciaron procesos

ABSTRACT

Characterization of livestock systems in the dry Caribbean for quantification of soil quality indicators. Introduction. Soil degradation processes are mainly associated with poor management practices and changes in its use. Indicators that allow knowing the state of the soil is required to seek for alternatives that will help to improve soil quality. **Objective.** To evaluate some edaphic indicators in different traditional bovine livestock systems in the Colombian Caribbean. **Materials and methods.** Soil samples in triplicate were collected from 72 farms distributed in 6 departments (Cordoba, Sucre, Bolivar, Atlantico, Cesar and Magdalena), for a total of 216 samples. Soil physical and chemical properties were evaluated in order to identify the main indicators to develop a soil

* Proyecto de investigación financiado por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural y la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia).

** Autor para correspondencia. Correo electrónico: jlcontreras@agrosavia.co

1 Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), C.I Turipaná, Colombia.
 0000-0002-8179-3430.

2 Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), C.I Turipaná, Colombia.
 0000-0002-8275-2956.

3 Corporación Colombiana de investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), C.I Turipaná, Colombia.

 0000-0002-1266-8505.

4 Corporación Colombiana de investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), C.I Turipaná, Colombia.

 0000-0002-1405-1066.

5 Corporación Colombiana de investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), C.I Turipaná, Colombia.

 0000-0001-5095-1232.

de compactación en todas las fincas evaluadas, con valores de densidad aparente superiores a $1,4 \text{ g.cm}^{-3}$, con predominio de texturas medias a finas (franco). Se encontraron valores de materia orgánica por encima de 2% en los departamentos de Córdoba ($3,18 \pm 0,99\%$) y Bolívar ($3,10 \pm 0,55\%$), contrario a lo identificado en Atlántico, Cesar y Magdalena con contenidos inferiores a 2%. La capacidad de intercambio catiónico efectivo (CICe) presentó valores superiores a $20 \text{ cmol}(+).\text{kg}^{-1}$ en la gran mayoría de los suelos evaluados, excepto los valores registrados en las fincas ubicadas en el departamento de Cesar. Los contenidos de P, S, Ca, Mg y K fueron altos en todas las fincas evaluadas. El índice de calidad del suelo está determinado por las propiedades químicas (pH, capacidad de intercambio catiónico y conductividad eléctrica). **Conclusiones.** Se reconocieron procesos de compactación relacionados con altos valores de densidad aparente y bajo contenido de poros totales. El manejo de suelo bajo los sistemas ganaderos es determinante en la cuantificación del índice de calidad de suelo.

INTRODUCCIÓN

La ganadería bovina es considerada de gran importancia socio económica debido a que cerca de 1300 millones de productores se dedican a esta actividad lo que contribuye en un 40 – 50% del producto interno bruto (PIB) agrícola a nivel mundial (FAO 2020).

Los problemas ambientales relacionados con la producción ganadera bovina están relacionados con la pérdida de biodiversidad (flora y fauna), debido a la reducción de los ecosistemas naturales de bosques, alteración de ciclos biogeoquímicos y pérdida de la macrofauna edáfica como escarabajos coprófagos. La disminución de la cobertura vegetal y el pisoteo del ganado generan alteraciones de las propiedades físicas e

hidrológicas del suelo (Tovar *et al.* 2016) que se manifiestan principalmente en el incremento de la densidad aparente y la resistencia a la penetración, por causa de procesos de compactación que reducen espacios porosos y generan disminución de infiltración en el suelo y aumento de la escorrentía superficial, lo que desencadena en pérdida de capa superficial productiva (erosión) (Siavosh *et al.* 2000). **Results.** Compaction processes were evident in all the evaluated farms with bulk density values higher than 1.4 g.cm^{-3} with a predominance of medium to fine textures (loam). Organic matter values above 2% were found in the departments of Cordoba ($3.18 \pm 0.99\%$) and Bolívar ($3.10 \pm 0.55\%$), contrary to what was identified in Atlantico, Cesar, and Magdalena with contents below to 2%. The effective cation exchange capacity presented values higher than $20 \text{ cmol}(+).\text{kg}^{-1}$ in most of the soils, except for the values registered in the farms located in the department of Cesar. The contents of P, S, Ca, Mg and K were high in all the evaluated farms. Soil quality index is determined by the chemical properties (pH, cation exchange capacity and electrical conductivity). **Conclusions.** Compaction processes related to high bulk density values and low total pore content were recognized. Soil management under the livestock systems is decisive in the quantification of the soil quality index.

hidrológicas del suelo (Tovar *et al.* 2016) que se manifiestan principalmente en el incremento de la densidad aparente y la resistencia a la penetración, por causa de procesos de compactación que reducen espacios porosos y generan disminución de infiltración en el suelo y aumento de la escorrentía superficial, lo que desencadena en pérdida de capa superficial productiva (erosión) (Siavosh *et al.* 2000).

En Colombia, el 77,6% del suelo dedicado a la ganadería presenta algún grado de erosión ligera hasta muy severa con pérdida de suelo cercanas a $25 \text{ ton suelo.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$ (IDEAM y U.D.C.A 2015), lo que conlleva a que sea necesario desarrollar y aplicar diferentes metodologías para determinar el estado de calidad del suelo, además de monitorear los cambios relacionados

con la actividad ganadera. La calidad del suelo es definida por el Comité para la Salud del Suelo de la Sociedad de Ciencia del Suelo de América como la capacidad del suelo para funcionar dentro de los límites de un ecosistema natural o manejado, además de sostener la productividad de las plantas y los animales, mantener o mejorar la calidad del aire y del agua, sostener la salud humana y el hábitat. Para que este concepto sea funcional es necesario disponer de variables que contribuyan en la evaluación de la condición del suelo, mediante indicadores, que conllevan al aporte de información sobre los cambios o tendencias (Dumanski *et al.* 1998).

Los indicadores de la calidad de suelo se conciben como una herramienta de medición que debe ofrecer información sobre las propiedades, los procesos y las características de este, para dar seguimiento a los efectos del manejo sobre el funcionamiento del suelo en un periodo dado (Calderón *et al.* 2002). Los indicadores de la calidad del suelo pueden ser las propiedades físicas, químicas y biológicas, así como los procesos que ocurren en este (SQI 1996).

Los indicadores de calidad del suelo permiten tener conocimiento de los diferentes grados o niveles de degradación de este recurso. Para la selección efectiva de indicadores en la evaluación de la calidad del suelo además de tener objetividad, se recomienda tener en cuenta las funciones del suelo productivas y ambientales (Barrera León *et al.* 2020).

La mayoría de los indicadores relacionados con la calidad del suelo, generados hasta el momento, son más amplios y abordan de manera general los servicios ecosistémicos en diferentes usos de la tierra (Lavelle *et al.* 2014, Velasquez y Lavelle 2019). Estos indicadores se pueden considerar como el insumo más importante en la planificación y posterior toma de decisiones en todo tipo de sistemas ganaderos, de forma que se pueda dar seguimiento preciso acerca de la influencia de este tipo de sistemas sobre la calidad del suelo.

Con el propósito de contribuir al conocimiento sobre los impactos de la ganadería

en Colombia y por medio de la utilización de indicadores de calidad del sector, surgió la presente investigación cuyo objetivo fue evaluar indicadores de calidad del suelo en diferentes sistemas ganaderos tradicionales del Caribe Seco Colombiano.

MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio comprendió fincas de producción bovina tradicional, ubicadas en la región Caribe Colombiana, las cuales abarcan los departamentos de Córdoba, Sucre, Bolívar, Magdalena, Atlántico y Cesar. Se identificaron fincas ganaderas con condiciones climáticas, edáficas y manejos similares. Las condiciones climáticas en el área de estudio presentaron un comportamiento unimodal biestacional (periodo seco diciembre-abril y de lluvias mayo-noviembre). La precipitación media anual (P, mm) registrada en las fincas seleccionadas varió de 1000 a 1500 mm.año⁻¹, temperatura media anual (T, °C) de 28,1°C y humedad relativa (HR, %) entre 70 a 80%. Según la clasificación de Holdridge (2000) el área de estudio pertenece a la zona agroecológica Bosque Seco Tropical (BsT).

Se evaluaron 12 fincas por departamento para un total de 72 fincas, distribuidas en 7 municipios del departamento de Atlántico (Galapa, Baranoa, Luruaco, Candelaria, Manatí, Repelón y Sabanalarga), 7 municipios en el departamento de Bolívar (Magangué, Calamar, San Juan de Nepomuceno, Carmen de Bolívar, Zambrano, María La Baja y Mahates), 11 municipios en Cesar (Valledupar, Codazzi, La Paz, San Diego, Aguachica, La Gloria, Pelaya, Curumaní, La Loma, Bosconia y El Copey), 10 municipios en Córdoba (Chinú, Sahagún, Ayapel, Ciénega de oro, Cereté, Montería, Canalete, Puerto escondido y Pueblo nuevo), 5 municipios en Magdalena (Pivijay, Fundación, Plato, El difícil y Pueblo nuevo) y 11 municipios en Sucre (Los Palmitos, Corozal, Sincé, Chocho, San Pedro, San Marco, San Benito Abad, Sincelejo, Sampedo, Tolú y Toluviéjo). Los suelos del área de estudio pertenecen al orden Inceptisol, con

texturas medias a finas, bien a imperfectamente drenados, pendientes del terreno inferiores a <7%. Las coberturas de suelo representativas del área de estudio fueron: *Megathyrsus maximus* cv Mombasa, *Cynodon nlemfuensis*, *Bothriochloa pertusa*, *Brachiaria decumbens* y *Brachiaria brizantha* cv. Toledo.

Muestreo y análisis de suelos. Se llevó a cabo durante el periodo de transición seco a lluvioso entre abril y mayo del 2016. Para la toma de muestras edáficas en cada finca se ubicó el área representativa de la misma, sobre las que se realizaron puntos de observación con dimensiones de 30 X 30 X 30 cm. En cada finca se tomaron muestras no perturbadas por triplicado con una distancia de 50 metros entre punto y semi perturbadas en las profundidades 0 a 10, 10 a 20 y 20 a 30 cm, para obtener 638 muestras para análisis físico de suelo y 216 para análisis químico de suelo.

La materia orgánica (Walkley–Black), fósforo disponible (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), azufre (S), boro (B), cobre (Cu), manganeso (Mn), hierro (Fe), zinc (Zn), la acidez activa (potenciométrico, relación 1:1 P/V), la acidez potencial (H + Al) y la capacidad de intercambio catiónico potencial (CEC pH7) se determinaron mediante los métodos analíticos descritos por IGAC (2006). La densidad aparente (D_a) se determinó con el uso del método del cilindro de volumen conocido ($98,17 \text{ cm}^3$), $D_a = M_{ss}/V_c$, donde M_{ss} = masa de suelo seco (g) a 105°C por 24 hr y V_c = volumen del cilindro (cm^3), la densidad real (D_r) por el método del picnómetro, la Porosidad total (Pt) del suelo por la relación entre D_a y D_r , $Pt = (1 - (D_a/D_r)) \times 100$. La distribución de partículas (textura) se determinó por el método de Bouyoucos (IGAC 2006). El índice de estabilidad estructural (IEE), se calculó según lo sugerido por Cherubin *et al.* (2016), $IEE = ((CO \times 1,724) / (\text{limos} + \text{Arcilla})) \times 100$.

Cálculo de índice de calidad de suelo (ICS). Se calculó un índice global de calidad

de suelo asociado a los sistemas de producción ganadero tradicional, con el fin de evaluar el efecto de este sistema productivo sobre la calidad del suelo.

Para el cálculo del ICS se utilizaron 21 variables, de las cuales 6 eran relacionadas con las propiedades físicas del suelo y 15 relacionadas con las propiedades químicas del suelo. Los datos de suelo de las profundidades 0 a 10, 10 a 20 y 20 a 30 cm fueron promediados y se trabajó con la profundidad 0 a 30, para el cálculo del índice de calidad de suelo (ICS).

Con el fin de disminuir la similitud de los datos e identificar los indicadores más eficientes, se realizó la selección de un conjunto mínimo de datos (CMD), con un análisis de componentes principales (ACP) (Andrews *et al.* 2002, Mukherjee y Lal 2014, Cherubin *et al.* 2016), para la selección de los componentes que generan una mayor explicación del comportamiento del suelo, se seleccionaron los componentes propios ≥ 1 (Kaiser 1960), los cuales fueron retenidos y sometidos a rotación varimax que mejoraron la capacidad de interpretación de los componentes seleccionados (Masto *et al.* 2007). En cada componente solo se conservaron los indicadores con valor absoluto mayor y los que estuvieran dentro del rango de 10% por debajo de este (Andrews *et al.* 2002, Liu *et al.* 2015, Cherubin *et al.* 2015, 2016), al retener más de un indicador en los componentes, se revisó el análisis de correlación significativo de Pearson ($p < 0,05$), se seleccionó el factor de mayor relevancia dentro del componente principal (Cherubin *et al.* 2015, 2016).

Construcción del índice. Luego de obtener el conjunto mínimo de datos (CMD), estos se transformaron mediante ecuaciones homotéticas no lineales y dieron valor a los indicadores de 0 a 1, en puntuaciones sin unidades (Andrews *et al.* 2002). La construcción de las curvas se realizó mediante la Ecuación 1: “más es mejor”, Ecuación 2: “menos es mejor” y “punto medio Óptimo” que es el promedio de las ecuaciones 1 y 2.

Ecuación 1

$$Puntuación = \frac{a}{\left[1 + \left(\frac{B - UB}{x - UB}\right)^S\right]}$$

Ecuación 2

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

Donde

- a = valor máximo de la puntuación que para este caso es 1.
- B = valor de la referencia (Tabla 1).
- LB = umbral inferior.
- UB = umbral superior.
- x = valor encontrado en el indicador o variable estudiada.
- S = pendiente de la ecuación constante igual a -2,5.

Tabla 1. Valores de referencia.

Indicador	Unidad	LB	V_I	UB	P_O	C_P	Referencia
pH	sin unidad	4,9	6,3	7,9	5,5 - 7,3	Óptima	ICA 1992, MejíaKerguelen <i>et al.</i> 2009
CE	dS cm ⁻¹	0,1	0,3	2,7	< 2	Menos es mejor	ICA 1992, Roveda <i>et al.</i> 2012, Cortes <i>et al.</i> 2013
CICE	cmol ₍₊₎ .kg ⁻¹	1,1	17,9	38,4	> 20	Más es mejor	ICA 1992, Roveda <i>et al.</i> 2012, Garcia Guzmán <i>et al.</i> 2019
IEE	sin unidad	1,1	5,6	17,7	> 9	Más es mejor	Fernández De Andrade 2014, Cherubin <i>et al.</i> 2016
Limo	%	4,3	28,4	57,6	25 -40	Óptimo	Burt 2014

pH; CE= conductividad eléctrica; CICE= capacidad de intercambio catiónico equivalente por suma de cationes; IEE= índice estabilidad estructural; L= limos; LB= umbral inferior; UB= umbral superior; V_I= valor del indicador (media); P_O.= punto óptimo; C_P.= curva de puntuación.

Las puntuaciones obtenidas integran el índice mediante el enfoque aditivo ponderado (Masto *et al.* 2007) mediante la ecuación 3.

Ecuación 3

$$ICS = \sum_{i=1}^n Wi.Si$$

Donde

- ICS = índice de calidad de suelo.
- Wi = peso de cada componente.
- Si = indicador retenido.

La ecuación fue normalizada al tomar como ICS máximo el valor de uno (1).

Los resultados normalizados del ICS se interpretaron con el uso de la Tabla 2, descrita por Cantú *et al.* 2009.

Tabla 2. Clases de calidad de suelo.

Índice de Calidad de Suelo (ICS)	Escala	Clase
Muy Alta Calidad	0,80 – 1,00	1
Alta Calidad	0,60 – 0,79	2
Moderada Calidad	0,40 – 0,59	3
Baja Calidad	0,20 – 0,39	4
Muy Baja Calidad	0,00 – 0,19	5

Análisis estadístico. Se realizó prueba de normalidad de Shapiro-Wilk ($p > 0,05$), lo cual indicó que no se requiere transformación de los datos. El análisis de componentes principales (ACP) se realizó mediante el procedimiento PROC FACTOR para seleccionar un conjunto mínimo de datos (CMD), basado en un enfoque estadístico. La comparación de los valores promedios de las variables fisicoquímicas por departamento se realizó por medio de análisis de varianza (ANOVA) con el procedimiento PROC GLM, para evaluar los efectos del manejo dentro de cada departamento sobre los indicadores de suelo y valores de índice de calidad de suelo (ICS) determinado. En los casos en que se detectaron diferencias a un nivel de significancia $p < 0,05$, se realizó una prueba de separación de

medias al utilizar HSD de Tukey. Las correlaciones lineales se verificaron mediante el análisis de correlación de Pearson (PROC CORR).

RESULTADOS

Propiedades fisicoquímicas de suelo.

La textura en las fincas dentro de los departamentos evaluadas estuvo dominada por partículas mayores a 0,05 mm (Arenas y limos), con predominio de texturas medias a finas (Franco a Franco Arcillo Arenoso). Las partículas de arcilla menores de 0,002 mm evidenciaron diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) entre los departamentos, según el comportamiento diferencial en los contenidos de arcilla entre los municipios de Atlántico ($25,31 \pm 12,59\%$) y Sucre ($14,07 \pm 4,71\%$) (Tabla 3). El índice de estabilidad estructural mostró comportamiento diferencial ($p < 0,05$) entre los departamentos de Córdoba y Magdalena (Tabla 3). La densidad aparente (D_a , $p < 0,05$) mostró valores elevados en casi todos los municipios con media general de $1,48 \pm 0,17 \text{ g.cm}^{-3}$, con rango de variación $1,40 \pm 0,18 \text{ g.cm}^{-3}$ (Magdalena) a $1,69 \pm 0,15 \text{ g.cm}^{-3}$ (Cesar) (Tabla 3).

Tabla 3. Parámetros físicos de suelo bajo sistema productivo ganadero (tradicional) en 6 departamentos de la Región Caribe Colombiana.

Propiedades +Abrev. Depto.	D_a (g.cm^{-3})	Pt (%)	Arena (%)	Arcilla (%)	Limo (%)	IEE	Clases texturales
ATL	$1,45 \pm 0,12$ b	$43,36 \pm 8,73$ b	$50,52 \pm 21,19$ a	$25,31 \pm 12,59$ a	$24,18 \pm 10,12$ a	$3,96 \pm 1,52$ ab	F-A-Ar
BOL	$1,42 \pm 0,10$ b	$46,41 \pm 3,94$ b	$46,68 \pm 16,80$ a	$19,20 \pm 12,71$ ab	$34,12 \pm 9,69$ a	$6,73 \pm 4,66$ ab	F
CES	$1,69 \pm 0,15$ a	$35,57 \pm 5,45$ a	$55,14 \pm 17,50$ a	$16,13 \pm 6,19$ ab	$28,73 \pm 13,93$ a	$4,08 \pm 2,21$ ab	F-Ar
CÓRD	$1,41 \pm 0,13$ b	$47,03 \pm 4,68$ b	$55,22 \pm 11,29$ a	$15,44 \pm 5,84$ ab	$29,34 \pm 10,01$ a	$7,43 \pm 3,43$ a	F-Ar
MAG	$1,40 \pm 0,18$ b	$47,80 \pm 6,72$ b	$45,54 \pm 18,98$ a	$26,22 \pm 11,19$ ab	$28,24 \pm 8,25$ a	$2,94 \pm 1,22$ b	F
SUC	$1,48 \pm 0,12$ b	$44,31 \pm 4,51$ b	$59,92 \pm 12,12$ a	$14,07 \pm 4,71$ b	$26,01 \pm 10,73$ a	$7,30 \pm 3,36$ a	F-Ar
ANOVA							
Media	$1,48 \pm 0,17$	$43,57 \pm 7,12$	$53,14 \pm 16,24$	$18,48 \pm 9,57$	$28,38 \pm 10,94$	$5,61 \pm 3,38$	
CV	9,03	13,11	31,65	50,49	39,23	55,21	
R ²	0,56	0,55	0,25	0,34	0,28	0,42	
Sig.	**	**	ns	*	ns	**	

+Abrev. Depto.= ATL= Atlántico; BOL= Bolívar; CES= Cesar; CÓRD= Córdoba; MAG= Magdalena; SUC= Sucre; \pm = desviación estándar; D_a = densidad aparente (g.cm^{-3}); Pt= porosidad total (%); IEE= índice de estabilidad estructural (adimensional); F-A-Ar= Franco- Arcilloso-Arenoso; F= Franco; F-Ar= Franco Arenoso; ANOVA= análisis de varianza; Sig= significancia estadística; ns= no significativo ($p > 0,05$); * significativo ($p < 0,05$); ** altamente significativo ($p < 0,0001$); Letras similares significa igual comportamiento; R²= coeficiente de determinación; CV= coeficiente de variación.

La reacción del suelo (pH), mostró comportamiento similar ($p > 0,05$) en todas las fincas evaluadas con variaciones de $6,12 \pm 0,99$ a $6,54 \pm 0,49$ (ligeramente ácido). Los parámetros químicos de suelo Materia orgánica (MO), Conductividad eléctrica (CE) y Capacidad de intercambio catiónico efectivo (CICE), mostraron diferencias estadísticas altamente significativas ($p < 0,0001$) entre las fincas en los departamentos evaluados. Los mayores contenidos de materia orgánica (MO) se presentaron en Córdoba ($3,18 \pm 0,99\%$) y Bolívar ($3,10 \pm 0,55\%$), contrario a lo evidenciado en Atlántico > Cesar > Magdalena con contenidos de materia orgánica inferiores a 2%. Las fincas evaluadas en el departamento de Magdalena presentaron el mayor índice de salinidad o conductividad eléctrica en el suelo, ya que registró $0,89 \pm 1,04$ dS.cm⁻¹, esto es, un incremento de más del 65% de lo consignado en los otros departamentos. Los valores reportados durante la evaluación en la capacidad de intercambio catiónico efectivo (CICE) evidenció que la gran mayoría de los suelos en las fincas evaluadas tienen alta capacidad de almacenar nutrientes de carga positiva o cationes, excepto los registrados en las fincas ubicadas en el departamento de Cesar, que evidenciaron valores inferiores a 10 cmol(+). kg⁻¹ (Tabla 4). Los elementos más presentes en el suelo fueron azufre, calcio, magnesio y sodio y expusieron diferencias estadísticas ($p < 0,0001$) entre departamento, excepto el fósforo y potasio intercambiable ($p > 0,05$). El contenido de azufre

(S) mostró comportamiento similar en 5 de los 6 departamentos evaluados, donde las fincas ubicadas en Magdalena evidenciaron ser las de mayor contenido promedio de S registrado ($47,42 \pm 61,03$ mg.kg⁻¹). El fósforo intercambiable en el suelo dentro de los predios evaluados presentó comportamiento similar con rango de variación de $13,19 \pm 13,31$ a $49,99 \pm 73,26$ mg.kg⁻¹. Las bases de intercambio (calcio, magnesio, potasio y sodio) estuvieron en un rango de medio a alto en todos los departamentos, excepto en algunas ocasiones los valores estuvieron en el rango bajo en el departamento del Cesar. Los elementos menores como hierro, zinc, manganeso y boro sólo presentaron diferencias significativas ($p < 0,005$) en los contenidos de zinc (Zn) y boro (B) entre los departamentos evaluados. Los valores registrados presentaron variación de medio a alto, lo que indica que no existieron deficiencias o/y toxicidad (Tabla 4). Algunas relaciones catiónicas mostraron diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) entre los municipios. La relación Ca/Mg; Mg/K, en todos los departamentos evaluados mostraron rangos adecuados, excepto las relaciones Ca/K; (Ca+Mg)/K, que presentaron valores superiores a 30 y 40 respectivamente, lo que indica deficiencia del elemento potasio (K) en el suelo. El departamento de Bolívar fue el que evidenció mayor inconveniente respecto a estas 2 relaciones con $36,95 \pm 40,34$ (Ca/K) y $52,21 \pm 19,86$ ((Ca+Mg)/K) (Tabla 4).

Tabla 4. Comportamiento de las características químicas del suelo dentro de cada departamento evaluado.

+Abrev. Depto. Propiedades	ATL		BOL		CES		CÓRD		MAG		SUC		ANOVA	
	LA	B	LA	B	LA	B	LA	B	LA	B	LA	B	Media	R ² CV Sig
pH	6,34±0,62 a	LA 6,54±0,49 a	LA 6,30±0,84 a	LA 6,26±0,58 a	LA 6,12±0,99 a	LA 6,16±0,53 a	LA 6,29±0,68	LA 6,29±0,68	LA 6,12±0,99 a	LA 6,16±0,53 a	LA 6,29±0,68	LA 6,29±0,68	0,19	11,48 ns
MO (%)	1,84±0,86 b	B 3,10±0,55 a	A 1,68±0,69 b	B 3,18±0,99 a	A 1,61±0,75 b	B 2,66±0,87 ab	M 2,39±1,51	M 2,39±1,51	A 1,61±0,75 b	B 2,66±0,87 ab	M 2,39±1,51	M 2,39±1,51	0,51	40,24 **
CE (dS.cm ⁻¹)	0,39±0,36 a	NS 0,29±0,13 a	NS 0,18±0,09 a	NS 0,25±0,13 a	NS 0,89±1,04 b	NS 0,20±0,06 a	NS 0,32±0,40	NS 0,32±0,40	NS 0,89±1,04 b	NS 0,20±0,06 a	NS 0,32±0,40	NS 0,32±0,40	0,38	119,53 **
CICs (cmol ₍₊₎ .kg ⁻¹)	19,78±1,45 a	M 20,81±4,26 a	A 7,56±4,24 b	B 21,49±8,11 a	A 21,11±11,18 a	A 20,35±10,76 a	A 17,93±9,88	A 17,93±9,88	A 21,11±11,18 a	A 20,35±10,76 a	A 17,93±9,88	A 17,93±9,88	0,46	48,47 **
Elementos Mayores														
S (mg.kg ⁻¹)	25,29±33,65 ab	A 9,08±10,89 b	B 4,95±5,29 b	B 7,67±6,38 b	B 47,42±61,03 a	A 3,5±1,67 b	B 13,35±26,44	B 13,35±26,44	B 47,42±61,03 a	A 3,5±1,67 b	B 13,35±26,44	B 13,35±26,44	0,39	185,07 **
P (mg.kg ⁻¹)	29,98±51,36 a	M 49,99±73,26 a	A 37,21±60,79 a	B 30,55±46,40 a	B 13,19±13,31 a	B 33,98±54,64 a	M 33,19±57,48	M 33,19±57,48	B 13,19±13,31 a	B 33,98±54,64 a	M 33,19±57,48	M 33,19±57,48	0,19	172,27 ns
Ca (cmol ₍₊₎ .kg ⁻¹)	12,41±8,06 a	A 14,80±4,32 a	A 6,01±3,81 ab	M 13,64±5,78 b	A 13,37±8,64 a	A 14,29±7,90 a	A 12,03±6,95	A 12,03±6,95	A 13,37±8,64 a	A 14,29±7,90 a	A 12,03±6,95	A 12,03±6,95	0,42	52,57 *
Mg (cmol ₍₊₎ .kg ⁻¹)	5,43±3,22 a	A 5,15±1,12 a	A 7,49±0,74 b	A 6,96±2,81 a	A 5,95±3,11 a	A 5,23±3,08 a	A 4,88±3,16	A 4,88±3,16	A 5,95±3,11 a	A 5,23±3,08 a	A 4,88±3,16	A 4,88±3,16	0,53	53,17 **
K (cmol ₍₊₎ .kg ⁻¹)	0,55±0,37 a	A 0,49±0,37 a	A 0,21±0,11 a	B 0,60±0,55 a	A 0,43±0,27 a	M 0,58±0,40 a	A 0,48±0,97	A 0,48±0,97	A 0,43±0,27 a	M 0,58±0,40 a	A 0,48±0,97	A 0,48±0,97	0,27	86,17 ns
Na (cmol ₍₊₎ .kg ⁻¹)	1,37±1,84 a	A 0,36±0,53 ab	B 0,13±0,12 b	B 0,28±0,22 ab	B 1,31±1,38 a	A 0,21±0,15 b	B 0,52±0,98	B 0,52±0,98	B 1,31±1,38 a	A 0,21±0,15 b	B 0,52±0,98	B 0,52±0,98	0,47	162,42 **
Elementos Menores														
Fe (mg.kg ⁻¹)	127,03±131,04 a	A 81,17±97,23 a	A 132,61±93,27 a	A 82,28±65,11 a	A 177,10±277,72 a	A 81,49±96,39 a	A 109,31±124,21	A 109,31±124,21	A 177,10±277,72 a	A 81,49±96,39 a	A 109,31±124,21	A 109,31±124,21	0,26	117,09 ns
Cu (mg.kg ⁻¹)	3,32±2,64 a	A 3,55±1,98 a	A 2,93±2,49 a	M 4,04±2,49 a	A 3,70±1,93 a	A 2,29±1,60 a	M 3,32±2,05	M 3,32±2,05	A 3,70±1,93 a	A 2,29±1,60 a	M 3,32±2,05	M 3,32±2,05	0,52	51,31 ns
Zn (mg.kg ⁻¹)	3,20±2,79 a	A 1,54±0,89 b	M 1,47±1,03 b	B 1,38±0,66 b	B 3,67±4,42 a	A 1,52±0,95 b	M 1,96±2,3	M 1,96±2,3	B 3,67±4,42 a	A 1,52±0,95 b	M 1,96±2,3	M 1,96±2,3	0,37	98,13 **
Mn (mg.kg ⁻¹)	6,57±6,62 a	M 3,63±2,87 a	B 5,38±2,81 a	M 4,78±4,37 a	B 7,88±7,56 a	M 3,54±1,84 a	B 5,16±4,54	B 5,16±4,54	M 4,78±4,37 a	M 3,54±1,84 a	B 5,16±4,54	B 5,16±4,54	0,26	90,51 ns
B (mg.kg ⁻¹)	0,39±0,18 ab	M 0,43±0,24 a	A 0,23±0,098 b	M 0,34±0,13 ab	M 0,27±0,18 ab	M 0,33±0,13 ab	M 0,33±0,13 ab	M 0,33±0,13 ab	M 0,27±0,18 ab	M 0,33±0,13 ab	M 0,33±0,13 ab	M 0,33±0,13 ab	0,41	45,74 *
Relaciones Cationicas														
Ca/Mg	2,54±0,95 b	M 3,01±1,17 ab	M 5,85±5,17 a	A 2,09±0,95 b	M 2,46±1,15 b	M 2,80±0,91 ab	M 3,23±2,85	M 3,23±2,85	M 2,46±1,15 b	M 2,80±0,91 ab	M 3,23±2,85	M 3,23±2,85	0,46	76,96 **
Mg/K	11,36±6,65 ab	M 14,18±7,45 ab	M 6,58±3,60 b	M 16,79±10,27 a	M 14,72±7,53 ab	M 12,04±7,50 ab	M 12,46±8,14	M 12,46±8,14	M 14,72±7,53 ab	M 12,04±7,50 ab	M 12,46±8,14	M 12,46±8,14	0,46	57,24 *
Ca/K	24,22±9,35 a	B 38,02±13,34 a	A 36,95±40,34 a	A 32,56±19,11 a	A 33,38±17,90 a	A 31,44±18,28 a	A 32,80±23,30	A 32,80±23,30	A 33,38±17,90 a	A 31,44±18,28 a	A 32,80±23,30	A 32,80±23,30	0,4	65,96 Ns
(Ca+Mg)/K	35,59±14,66 a	B 52,21±19,86 a	A 43,53±41,64 a	A 49,36±28,52 a	A 48,10±22,33 a	B 43,48±25,30 a	A 45,27±27,94	A 45,27±27,94	A 48,10±22,33 a	B 43,48±25,30 a	A 45,27±27,94	A 45,27±27,94	0,4	57,16 Ns

Las letras resaltadas en negrita son la interpretación de los valores obtenidos en las variables químicas de suelo ICA (1992). Las abreviaturas LA= ligeramente ácido; A= alto; M= medio; B= bajo; NS= no salino; ANOVA= análisis de varianza; Sig= significancia estadística; letras iguales es ns= no significativo (p>0,05); *significativo (p<0,05); ** altamente significativo (p<0,0001); R²= coeficiente de determinación; CV= coeficiente de variación.

Análisis de componentes principales (ACP) y correlaciones de Pearson. El análisis de componentes principales (ACP) permitió observar el comportamiento de los 21 indicadores fisicoquímicos de suelo evaluados, lo que destaca un conjunto mínimo de datos (CMD) capaz de explicar el comportamiento del suelo. Se encontró que 5 componentes principales (CP) obtuvieron valores propios >1 , que explican el 77,7% de la varianza total (Tabla 5). El CP1 (explica el 31,1% de la varianza), aspecto que evidencia la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICe) con el valor de carga absoluto más alto (0,898), seguida de las bases intercambiables magnesio (Mg), calcio (Ca) (0,888; 0,812, respectivamente) y los parámetros físicos de suelo porosidad total (Pt) y densidad aparente (Da) (0,837 y 0,834 respectivamente), los cuales presentaron valores dentro del rango permitido del 10% del valor más grande. Los indicadores CICe, Mg, Ca, Pt y Da, se correlacionaron

significativamente (Tabla 6), por lo que se seleccionó el indicador de mayor carga CICe, para representar el CP1. Para CP2 (explica el 21,6% de la varianza) la conductividad eléctrica (CE) evidenció el mayor valor de carga (0,904), seguido del elemento mayor azufre (S, 0,856) que estuvo dentro del 10%. Los indicadores CE y S, evidenciaron alta correlación significativa (Tabla 6), por lo que se seleccionó la CE, para representar el CP2. Para CP3 (explica el 10% de la varianza) la reacción del suelo (pH) presentó el valor de carga más alto (0,867). El CP4 (explica el 8,1% de la varianza) el contenido de limo (L) en el suelo presentó el valor de carga más alto (0,838), y el CP5 (explica el 6,9% de la varianza) que identificó el índice de estabilidad estructural (IEE) con la mayor carga (0,733), seguido del contenido de arcilla (A) (-0,709) (Tabla 5), los indicadores IEE y A, presentaron correlación significativa (Tabla 6), por lo que seleccionó al IEE, para representar el CP5.

Tabla 5. Resultados análisis componentes principales.

	Componentes principales					
	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	CP 5	
Autovalor	6,5	4,5	2,1	1,7	1,4	
Varianza (%)	31,1	21,6	10,0	8,1	6,9	
Acumulada (%)	31,1	52,7	62,7	70,8	77,7	
Indicador de Suelo ⁺⁺	Vectores propios ⁺					Comunalidades
Ar	-0,240	-0,138	-0,073	-0,701	0,609	0,944
A	0,329	0,367	-0,053	0,232	-0,709	0,803
L	0,068	-0,116	0,154	0,838	-0,284	0,824
Da	-0,834	-0,204	0,014	-0,020	0,032	0,739
Pt	0,837	0,186	-0,002	0,086	-0,064	0,746
IEE	0,497	-0,106	0,147	-0,221	0,733	0,865
pH	0,134	-0,030	0,867	-0,144	-0,055	0,795
MO	0,717	-0,079	0,256	0,219	0,448	0,835
CE	0,207	0,904	0,098	0,059	-0,085	0,881
CICe	0,898	0,119	0,297	0,032	-0,067	0,914
P	-0,094	0,040	0,745	0,336	0,217	0,725
S	0,235	0,856	0,074	-0,051	-0,225	0,847
Ca	0,812	0,038	0,400	-0,011	0,056	0,825
Mg	0,888	0,074	0,002	0,093	-0,181	0,835
K	0,442	0,010	0,545	0,287	-0,042	0,577
Na	0,254	0,677	-0,051	-0,014	-0,485	0,760
Fe	-0,275	0,573	-0,428	0,493	0,032	0,831
Mn	-0,088	0,222	-0,600	0,226	-0,041	0,470
Zn	-0,046	0,714	-0,248	0,454	0,090	0,788
Cu	0,162	0,260	-0,151	0,741	0,021	0,667
B	0,454	0,225	0,618	-0,016	0,056	0,642

⁺ Los datos resaltados en negrita, fueron los seleccionados para la obtención del conjunto mínimo de datos (CMD) para obtener el índice de calidad de suelo (ICS);

⁺⁺ Las abreviaturas son las mismas que las utilizadas en las Tabla 3 y 4.

Tabla 6. Coeficiente de correlación de Pearson entre diferentes indicadores físico y químicos de suelo evaluados en 72 fincas en 6 departamentos, Colombia, 2016.

Indicador		Coeficientes de correlación Pearson, N = 216																				
		Arena	Arcilla	Limo	Da	Pt	IEE	pH	MO	CE	CICE	P	S	Ca	Mg	K	Na	Fe	Mn	Zn	Cu	B
Arena	β	-0,758 §<0,001	-0,821 §<0,001	0,222 0,065	0,222 0,065	-0,288 0,016	0,42 0,0003	-0,018 0,882	-0,134 0,269	-0,287 0,016	-0,311 0,009	-0,12 0,321	-0,293 0,014	-0,191 0,113	-0,378 0,001	-0,285 0,017	-0,456 §<0,001	-0,317 0,008	-0,137 0,258	-0,332 0,007	-0,503 §<0,001	-0,158 0,191
Arcilla		1	0,251 0,056	-0,298 0,012	0,006 0,001	-0,376 0,001	0,012 0,921	-0,014 0,908	0,391 0,001	0,401 0,001	0,401 0,001	-0,081 0,507	0,461 §<0,001	0,251 0,056	0,47 §<0,001	0,194 0,107	0,678 §<0,001	0,258 0,031	0,23 0,056	0,385 0,001	0,268 0,025	0,176 0,144
Limo			1	-0,069 0,572	0,141 0,245	-0,295 0,013	0,016 0,894	0,211 0,079	0,211 0,079	0,084 0,49	0,111 0,359	0,249 0,037	0,032 0,794	0,064 0,597	0,15 0,216	0,252 0,035	0,084 0,488	0,245 0,041	0,002 0,985	0,142 0,241	0,512 §<0,001	0,08 0,508
Da				1	-0,916 §<0,001	0,024 0,632	-0,058 0,632	-0,494 §<0,001	-0,377 0,001	-0,681 0,001	0,111 0,933	0,01 0,001	-0,406 0,001	-0,602 §<0,001	-0,653 §<0,001	-0,418 0,003	-0,325 0,006	0,108 0,375	0,098 0,419	-0,063 0,606	-0,244 0,042	-0,374 0,001
Pt					1	0,238 0,048	0,074 0,542	0,494 §<0,001	0,366 0,002	0,609 0,002	0,092 0,871	0,391 0,001	0,166 0,001	0,616 0,001	0,678 0,001	0,429 0,002	0,429 0,002	-0,08 0,51	-0,073 0,484	0,084 0,889	0,261 0,029	0,379 0,001
IEE						1	0,21 0,081	0,782 §<0,001	-0,072 0,553	0,422 0,003	0,136 0,261	-0,128 0,29	0,487 0,001	0,499 0,001	0,296 0,118	0,126 0,3	-0,208 0,084	-0,352 0,003	-0,207 0,086	-0,168 0,166	-0,182 0,132	0,333 0,005
pH							1	0,268 0,025	0,078 0,523	0,402 0,001	0,524 0,001	0,074 0,544	0,499 0,001	0,664 0,001	0,56 0,001	0,4 0,001	-0,006 0,96	-0,533 §<0,001	-0,465 0,014	-0,293 0,014	-0,116 0,339	0,513 §<0,001
MO								1	0,086 0,479	0,66 0,001	0,241 0,044	0,012 0,92	0,664 0,001	0,664 0,001	0,56 0,001	0,4 0,001	-0,019 0,876	-0,218 0,07	-0,215 0,074	-0,049 0,859	0,149 0,218	0,528 0,001
CE									1	0,326 0,006	0,019 0,875	0,9 0,041	0,245 0,001	0,245 0,041	0,261 0,029	0,163 0,178	0,642 0,001	0,454 0,001	0,05 0,681	0,559 0,001	0,296 0,013	0,284 0,017
CICE										1	0,136 0,26	0,321 0,007	0,955 0,001	0,955 0,001	0,867 0,001	0,555 0,001	0,303 0,011	-0,275 0,021	-0,179 0,138	0,03 0,807	0,15 0,217	0,575 0,001
P											1	-0,071 0,557	0,21 0,081	0,21 0,081	-0,067 0,58	0,455 0,001	-0,075 0,535	-0,135 0,266	-0,194 0,107	0,064 0,599	0,033 0,785	0,385 0,001
S												1	0,235 0,05	0,235 0,05	0,106 0,381	0,669 0,001	0,329 0,001	0,046 0,703	0,434 0,002	0,285 0,017	0,316 0,008	
Ca													1	0,696 §<0,001	0,508 0,001	0,104 0,39	0,349 0,003	0,281 0,019	-0,064 0,601	0,087 0,473	0,571 0,001	
Mg														1	0,469 0,001	0,399 0,001	0,166 0,17	0,017 0,891	0,088 0,471	0,211 0,079	0,417 0,003	
K															1	0,081 0,504	0,195 0,106	0,302 0,011	0,046 0,703	0,181 0,135	0,464 0,001	
Na																1	0,294 0,013	0,246 0,04	0,437 0,002	0,134 0,269	0,224 0,062	
Fe																	1	0,377 0,001	0,715 0,001	0,479 0,001	0,264 0,027	
Mn																		1	0,474 0,001	0,236 0,049	0,273 0,022	
Zn																			1	0,482 0,001	0,042 0,73	
Cu																				1	0,015 0,9	

Φ Indicadores descritos en la Tabla 4.

β Los coeficientes de correlación de Pearson significativos (p < 0,05) están en negrita.

§ Probabilidad de error.

El conjunto mínimo de datos seleccionado (CMD) para explicar el comportamiento del suelo fueron; en el CP1, CICE; en el CP2, CE; en el CP3, pH; en el CP4, Limo (L) y en el CP5, IEE.

Índices de calidad de suelo (ICS). Con base en el conjunto mínimo de datos (CMD) y su participación por componente principal (CP), se construyeron los índices de calidad de suelo de

los parámetros fisicoquímicos obtenidos dentro del sistema productivo ganadero en los diferentes departamentos. El índice asociado a la conductividad eléctrica (CE), presentó mayor peso dentro de los índices obtenidos, seguido de la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE) y reacción del suelo (pH). El índice de calidad del suelo (ICS) estuvo dominado por las propiedades químicas del suelo (Figura 1).

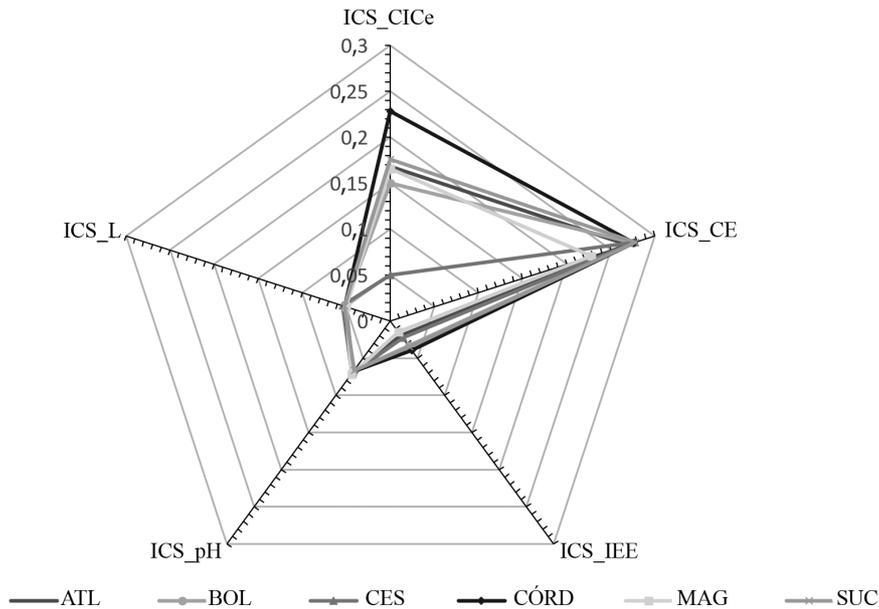


Figura 1. Índices de calidad de suelo (ICS) bajo el sistema productivo ganadero.

El análisis estadístico de los ICS (IEE, L, CE, CICE) evidenció comportamiento diferencial

significativo ($p < 0,05$) en los departamentos evaluados (Tabla 7).

Tabla 7. Diferencias estadísticas entre el grupo de índices de calidad de suelo obtenidos.

+Abrev. Depto.	CMD				
	IEE	Limo	pH	CE	CICE
ATL	ab	a	a	A	ab
BOL	a	a	a	A	ab
CES	ab	a	a	A	b
CÓRD	ab	a	a	A	A
MAG	b	a	a	B	Ab
SUC	a	a	a	A	A
Sig.	**	ns	ns	**	**

CMD= Conjunto mínimo de datos.

Las abreviaturas se describieron en las Tablas 3 y 4.

** alta significancia estadística (p<0,001); ns, no significativo.

Para la integración del índice de calidad de suelo (ICS), asociado con el CMD se

utilizó la ecuación 4. La misma se expone a continuación.

Ecuación 4

$$ICS = 0,40 \times CICE + 0,28 \times CE + 0,13 \times pH + 0,10 \times Limo + 0,09 \times IEE$$

Los resultados obtenidos mostraron diferencias estadísticas significativas (p<0,0001) dentro del sistema productivo ganadero respecto a los departamentos evaluados (Figura 2). Los

departamentos de Sucre y Córdoba presentaron los valores más altos de ICS, contrario a lo reportado por el departamento de Cesar bajo este sistema productivo con ICS de 0,47±0,03.

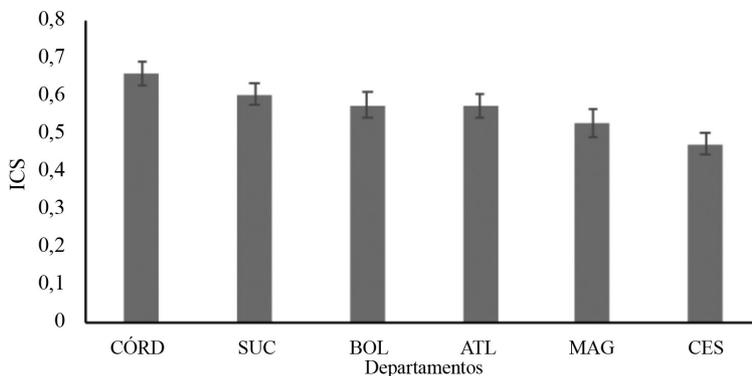


Figura 2. Índice de calidad de suelo (ICS) en sistemas de producción bovina tradicionales en el Caribe Colombiano.

DISCUSIÓN

Propiedades fisicoquímicas. La densidad aparente (D_a) mostró valores restrictivos para el desarrollo de las raíces de las gramíneas establecidas, de acuerdo con Burt (2014), valores superiores a $1,4 \text{ g.cm}^{-3}$, en suelos de texturas francas o franco-arenoso, son valores limitantes para el desarrollo radicular, y corresponden a suelos con algún grado de compactación (Ojeda-Quintana *et al.* 2018). Resultados similares reportaron Romero-Barrios *et al.* (2015), en suelos forestales y ganaderos, con predominio de texturas franco-arenosas, para evidenciar que los valores superiores a $1,4 \text{ g.cm}^{-3}$, son limitantes para el desarrollo radicular, lo cual puede estar asociado al empleo de prácticas inadecuadas de manejo. El aumento de la densidad aparente incrementó la compactación del suelo, aspecto que limitó la retención del agua (Muscolo *et al.* 2014). Diferentes personas autoras han reportado que valores inferiores al 50% en la porosidad total, está asociado a la reducción de los espacios porosos y procesos de compactación, lo que conlleva a una difusión baja del oxígeno dentro del suelo, baja infiltración del agua y alta escorrentía superficial (Salamanca y Amézquita 2015, Contreras Santos *et al.* 2020). El índice de estabilidad de agregados (IEE) se relacionó con el grado de degradación del suelo, relación que se presentó entre el contenido de materia orgánica (MO) y la fracción mineral fina del suelo. De acuerdo con Fernández De Andrade (2014) los valores inferiores a 5 indican suelos degradados, entre 5 y 7 suelos con alto riesgo a degradación, entre 7 y 9 suelos con moderado riesgo a la degradación y valores de IEE superiores a 9 indican suelos estructuralmente estables. Con base a esta afirmación 3 de los departamentos (Cesar, Atlántico y Magdalena) con suelos dedicados al sistema productivo ganadero se encuentran en estado de degradación estructural, situación que evidenció que las fincas evaluadas en el departamento de Magdalena presentaran las condiciones más críticas, aspecto asociado al bajo contenido de materia orgánica y altos contenidos de la fracción mineral fina (Tablas 3 y 4). Valores altos de

IEE, están relacionados con altos contenidos de materia orgánica (Reynolds *et al.* 2009). Las fincas evacuadas en el departamento de Bolívar son de alto riesgo de degradación, contrastado con lo encontrado en los departamentos de Córdoba y Sucre, en riesgo moderado de degradación estructural. Los resultados químicos de suelo (Tabla 4) se interpretaron mediante los estimativos conceptuales reportados por ICA (1992) para suelos en condición tropical y requerimientos nutricionales para cada gramínea establecida. La reacción del suelo (pH) se mantuvo en todas las fincas evaluados en suelos ganaderos una condición ligeramente ácida (>6), la cual, no es restrictiva para las gramíneas establecidas (ICA 1992). Estudios realizados sobre tolerancia de acidez de diferentes gramíneas (*Brachiaria* y *Cynodon nlemfuensis*) encontraron que valores inferiores a pH 5,5, son restrictivos para algunas *Brachiaris* y pasto estrella (Mejía Kerguelen *et al.* 2009, Villalobos y Arce 2013). Los valores reportados en este estudio son adecuados para el desarrollo de las gramíneas establecidas en las diferentes fincas evaluadas. Los contenidos de materia orgánica en el suelo evidenciaron valores en rangos altos (>3) (Tabla 4), excepto en los departamentos de Atlántico y Magdalena, donde el rango fue bajo (<2) (ICA 1992), el contenido de materia orgánica (MO) presentó correlación significativa (Tabla 7) con los parámetros físicos de suelo evaluados, que resalta valores altos de MO mejoran las propiedades físicas del suelo (ej. disminución de la densidad aparente y aumento de la porosidad total del suelo). Resultados similares reportaron Casals *et al.* (2013) y Contreras Santos *et al.* (2019, 2020), cuando evaluaron diferentes sistemas de producción ganadero, donde encontraron que valores elevados de materia orgánica, mejoran las propiedades hidrodinámicas del suelo (retención de humedad), difusión de oxígeno, porosidad y disminución de procesos de compactación. Los valores obtenidos de la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICe) fueron altos en los suelos bajo el sistema productivo ganadero en 5 de los departamentos evaluados, excepto en el departamento de Cesar

con valores bajos (ICA 1992, García-Guzmán *et al.* 2019). La CICE es considerada un indicador de gran relevancia en la calidad del suelo, basado en la interacción con las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo (Doran y Parkin 1994, Ojeda-Quintana *et al.* 2018).

Índice de calidad de suelo (ICS). El conjunto mínimo de datos (CMD) obtenidos para la construcción del índice de calidad de suelo (CICE, CE, pH, IEE y Limo) en sistemas ganaderos dentro de las fincas evaluadas en 6 departamentos, mostraron que los indicadores con mayor peso o sensibilidad para la construcción del ICS están relacionados con las propiedades químicas CE y CICE (Figura 1), asociadas a la concentración de sales y disponibilidad de nutrientes en el suelo. Diferentes investigaciones y personas expertas en el tema, han corroborado la importancia de los indicadores que se seleccionaron para este estudio (Doran y Parkin 1994, Andrews *et al.* 2002, Cherubin *et al.* 2016, Mukhopadhyay *et al.* 2016). El CMD seleccionados cumplen con los criterios establecidos por Cantú *et al.* (2009), número mínimo de variables o atributos de suelo que integran información de otras variables asociadas, incorpora indicadores físicos, químicos y fisicoquímicos, y en su mayoría son de fácil medición. Además, se encontró que los ICS asociados al CMD no superaron 0,39 (Figura 1) en la escala de 1 (Tabla 2) diseñada por Cantu *et al.* (2009), donde estos valores son considerados como bajos. La integración y/o adición (Ecuación 4) de los índices permitió conocer el estado de calidad de los diferentes suelos bajo el sistema productivo ganadero en los 6 departamentos (Figura 2). Córdoba ($0,66 \pm 0,10$) y Sucre ($0,61 \pm 0,12$) presentaron el índice de calidad de suelo más elevado, valor interpretado como un índice de alta calidad de suelo (Tabla 2), ubicándolos en suelos clase 2 (Cantu *et al.* 2009), los otros 3 departamentos (Bolívar>Atlántico>Magdalena) en un índice de calidad moderada, y los suelos evaluados en el departamento de Cesar ($0,47 \pm 0,03$) en ICS baja.

CONCLUSIONES

Los suelos de las fincas ganaderas evaluadas en los 6 departamentos presentaron procesos de compactación, relacionados con altos valores de densidad aparente y bajo contenido de poros totales. El contenido de nutrientes del suelo fue mayor en el departamento de Córdoba > Magdalena > Sucre > Bolívar. El manejo de suelo bajo los sistemas de producción bovina implementado fue determinante en la cuantificación del índice de calidad de suelo (ICS), para evidenciar que los menores valores de calidad de suelo se registraron en el departamento de Cesar. El conjunto mínimo de datos (CMD) seleccionados para realizar la evaluación de índice de calidad de suelo (ICS), fueron respuesta instantánea del periodo de evaluación, al presentar un ICS susceptible a factores ambientales así como el uso del suelo y antrópicos.

AGRADECIMIENTOS

Las personas autoras agradecen a la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA) y Ministerio de Agricultura y Desarrollo rural (MADR) por el financiamiento de esta investigación, desarrollada dentro del proyecto “Estrategias para mejorar la competitividad y sostenibilidad de producción de carne y leche en el Caribe húmedo”.

LITERATURA CITADA

- Andrews, SS; Karlen, DL; Mitchell, JP. 2002. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 90(1):25-45. DOI: 10.1016/s0167-8809(01)00174-8.
- Barrera León, J; Barrezueta Unda, S; García Batista, RM. 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.
- Burt, R. 2014. Soil survey field and laboratory methods manual. Soil Survey Investigations Report N°. 51, Version 2. US Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, WA, USA. 457 p.

- Calderón, MA; Moreno, MM; Barra, JE. 2002. Derivación de indicadores de calidad de suelos en el contexto de la agricultura sustentable. *Agrociencia* 36(5):605-620.
- Cantú, MP; Becker, AR; Bedano, JC; Schiviano, HF.; Parra, BJ. 2009. Evaluation of the impact of land use and management change by means of soil quality indicators, Cordoba, Argentina. *Cadernos Lab. Xeoloxico de Laxe. Coruna* 34:203-214.
- Casals, P; Romero, J; Rusch, GM; Ibrahim, M. 2013. Soil organic C and nutrient contents under trees with different functional characteristics in seasonally dry tropical silvopastures. *Plant and Soil* 374(1-2):643-659. DOI: 10.1007/s11104-013-1884-9.
- Cherubin, MR; Franco, ALC; Cerri, CE; Oliveira, DM; da S; Davies, CA; Cerri, CC. 2015. Sugarcane expansion in Brazilian tropical soils—Effects of land use change on soil chemical attributes. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 211:173-184. DOI: 10.1016/j.agee.2015.06.006.
- Cherubin, MR; Karlen, DL; Cerri, CE; Franco, AL; Tormena, CA; Davies, CA; Cerri, CC. 2016. Soil Quality Indexing Strategies for Evaluating Sugarcane Expansion in Brazil. *PLoS one* 11(3):e0150860. DOI: 10.1371/journal.pone.0150860.
- Contreras Santos, J; Martínez Atencia, J; Cadena-Torres, J; Falla Guzmán, CK. 2019. Evaluación del carbono acumulado en suelo en sistemas silvopastoriles del Caribe Colombiano. *Agronomía Costarricense* 44(1):29-41. DOI: 10.15517/rac.v44i1.39999.
- Contreras Santos, J; Martínez-Atencia, J; Cadena-Torres, J; Novoa-Yanez, R; Tamara-Morelos, R. 2020. Una evaluación de las propiedades fisicoquímicas de suelo en sistema productivo de maíz - algodón y arroz en el Valle del Sinú en Colombia. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica* 23(2):1-10 DOI: 10.31910/rudca.v23.n2.2020.1375.
- Cortés, D; Pérez, J; Camacho Tamayo, J. 2013. Relación espacial entre la conductividad eléctrica y algunas propiedades químicas del suelo. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica* 16(2):401-408. DOI: 10.31910/rudca.v16.n2.2013.912.
- Doran, JW; Parkin, TB. 1994. Defining and assessing soil quality. In Doran, JW; Coleman, DC; Bezdicek, DF; Stewart, BA (eds.). *Defining soil quality for a sustainable environment*. Madison, WI, USA, SSSA. p. 1-20.
- Dumanski, J; Gameda, S; Pieri, C. 1998. Indicators of land quality and sustainable land management. Washington DC, USA, World Bank Books. s.p. DOI: 10.1596/0-8213-4208-8.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2020. FAOSTAT. Ganadería [dataset]. Consultado 23 abr. 2020. Disponible en <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QA>
- Fernández De Andrade, L. 2014. Aplicación del índice de estabilidad estructural de Pieri (1995) a suelos montañosos de Venezuela (en línea). *Terra. Nueva Etapa XXX* (48):143-153. Consultado 22 ene. 2021. Disponible en <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=721/72132517007>
- García-Guzmán, S; Bautista-Montealegre, L; Bolaños-Benavides, 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):e1192. DOI: 10.31910/rudca.v22.n1.2019.1192.
- Holdridge, L. 2000. Ecología basada en zonas de vida. San José, Costa Rica, Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, IICA. 225 p.
- ICA (Instituto Colombiano Agropecuario). 1992. Fertilización en diversos cultivos. Quinta aproximación. Manual de Asistencia Técnica N°. 25. Colombia, Instituto Colombiano Agropecuario. 64 p.
- IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales); UDCA (Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales). 2015. Síntesis del estudio nacional de la degradación de suelos por erosión en Colombia 2015. Bogotá D.C., Colombia. IDEAM - MADS. 62 p.
- IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). 2006. Métodos analíticos del laboratorio de suelos. 6 ed. Bogotá, Colombia, Imprenta Nacional de Colombia. 648 p.
- Kaiser, HF. 1960. The application of electronic computers to factor analysis. *Educ. Psychol. Meas.* 29:141-151.
- Lavelle, P; Rodríguez, N; Arguello, O; Bernal, J; Botero, C; Chaparro, P; Fonte, SJ. 2014. Soil ecosystem services and land use in the rapidly changing Orinoco River Basin of Colombia. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 185:106-117. DOI: 10.1016/j.agee.2013.12.020.
- Liu, Z; Zhou, W; Lv, J; He, P; Liang, G; Jin, H. 2015. A Simple Evaluation of Soil Quality of Waterlogged Purple Paddy Soils with Different Productivities. *PLoS one* 10(5):e0127690. DOI: 10.1371/journal.pone.0127690.
- Masto, RE; Chhonkar, PK; Singh, D; Patra, AK. 2007. Alternative soil quality indices for evaluating the effect of intensive cropping, fertilization and manuring for 31 years in the semi-arid soils of India. *Environmental Monitoring and Assessment* 136(1-3): 419–435. DOI: 10.1007/s10661-007-9697-z.
- Mejía Kerguelen, S; Rao, I; Ramírez, H; Louw-Gaume, A; Gaume, A; Frossard, E. 2009. Atributos morfológicos y fisiológicos de genotipos de *Brachiaria* en un suelo con bajo fósforo disponible y alta saturación de aluminio (en línea). *Acta Agronómica* 58(1):1-8. Consultado 29 abr. 2020. Disponible en <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=1699/169913326001>

- Mukherjee, A; Lal, R. 2014. Comparison of Soil Quality Index Using Three Methods. PLoS one 9(8):e105981. DOI: 10.1371/journal.pone.0105981.
- Mukhopadhyay, S; Masto, R. E; Yadav, A; George, J; Ram, LC; Shukla, SP. 2016. Soil quality index for evaluation of reclaimed coal mine spoil. Science of The Total Environment 542:540-550. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.10.035.
- Muscolo, A; Panuccio, MR; Mallamaci, C; Sidari, M. 2014. Biological indicators to assess short-term soil quality changes in forest ecosystems. Ecological Indicators 45:416-423. DOI: 10.1016/j.ecolind.2014.04.047.
- Ojeda-Quintana, LJ; Machado-Díaz, Y; Bernal-Carrazana, Y; Hernández-Vilches, ME; Font-Vila, L; Hernández-Rodríguez, C; Casanovas-Cosío, E. 2018. Soil quality index in the Animal Husbandry Enterprise El Tablón (Cienfuegos, Cuba). Pastos y Forrajes 41(1):13-20.
- Reynolds, WD; Drury, CF; Tan, CS; Fox, CA; Yang, XM. 2009. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. Geoderma, 152(3-4):252-263. DOI: 10.1016/j.geoderma.2009.06.009.
- Roveda, G; Peñaranda, A; Ramírez, M; Baquero, I; Galindo, PR. 2012. Diagnóstico de la fertilidad química de los suelos de los municipios de Granada y Sylvania para la producción de uchuva en Cundinamarca. Ciencia y Tecnología Agropecuaria 13(2):179-188. Consulta 18 may. 2021. Disponible en <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=449945033007>
- Romero-Barrios, C; García-Gallegos, E; Hernández-Acosta, E. 2015. Materia orgánica y densidad aparente en suelos del suroeste de La Malinche, Tlaxcala, México. REIBCI 2(5):63-70.
- Salamanca, A; Amézquita, E. 2015. Influencia de la intensidad de uso sobre algunas propiedades físicas en un suelo del Valle del Cauca, Colombia. RIAA 6(1):43-52.
- Siavosh, S; Rivera, J; Gómez, M. 2000. Impacto de sistemas de ganadería sobre las características físicas, químicas y biológicas de suelos en los Andes de Colombia. Agroforestería para la Producción Animal en Latinoamérica. Cali, Colombia, FAO-CIPAV. p. 77-95.
- SQI (Soil Quality Institute). 1996. Indicators for soil quality evaluation. USDA natural resources conservation service. The National Soil Survey Center / The Soil Quality Institute, NRCS, USDA /The National Soil Tilth Laboratory, Agricultural Research Service. USA. s.p.
- Tovar, H; Noriega, J; Caraballo, P. 2016. Efecto de la ivermectina sobre la estructura del ensamble de escarabajos coprófagos (Coleoptera: Scarabaeidae: Aphodiinae Scarabaeinae) en las sabanas colombianas de la región Caribe. Actualidades Biológicas 38(April):157-166. DOI: 10.17533/udea.acbi.v38n105a03.
- Velasquez, E; Lavelle, P. 2019. Soil macrofauna as an indicator for evaluating soil based ecosystem services in agricultural landscapes. Acta Oecologica 100:103446. DOI: 10.1016/j.actao.2019.103446.
- Villalobos, L; Arce, J. 2013. Evaluación agronómica y nutricional del pasto estrella africana (*Cynodon nlemfuensis*) en la zona de Monteverde, Puntarenas, Costa Rica. I. Disponibilidad de biomasa y fenología. Agronomía Costarricense 37(1):91-101.



