

El Cultivo de Cacao: Evaluación de la Fertilidad y Principales Limitantes Edáficos, Sur de Córdoba - Colombia Cocoa Production Systems: Evaluation of Fertility and Main Edaphic Limitations, South of Córdoba - Colombia

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

¹ Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - Agrosavia. Centro de investigación Turipaná. Vía Montería-Cereté, km 13. 230550 Cereté, Córdoba, Colombia; (J.L.C.S.), (J.M.A.), (C.K.F.G.), (J.L.R.V.), (J.G.P).

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

RESUMEN

Los municipios ubicados en el sur de Córdoba presentan un alto potencial para el desarrollo del cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L), cuya productividad depende de condiciones edáficas específicas. En este sentido, se hace necesario evaluar si los suelos del sur de Córdoba presentan las condiciones óptimas para su establecimiento y desarrollo. Este trabajo tuvo como objetivo caracterizar las propiedades fisicoquímicas de los suelos cacaoteros e identificar sus principales limitaciones. La investigación se realizó en el año 2022, en cuatro municipios: Tierralta, Valencia, Montelíbano y Puerto Libertador, donde se evaluaron 111 fincas cacaoteras de distintas edades (5 a 25 años), evaluando propiedades fisicoquímicas del suelo (método cuantitativo), parámetros en campo y laboratorio. No se evidenciaron procesos de compactación, asociados a valores bajos de densidad aparente (Da), el grupo textural predominante fue el franco arcilloso (F Ar). El pH presentó valores ligeramente ácido restrictivos para el cultivo en Montelíbano y Puerto Libertador, el contenido de fósforo (P) fue bajo ($<15 \text{ mg kg}^{-1}$), con alta variabilidad ($\text{CV} > 100\%$). La materia orgánica mostró niveles medio a alto, y las bases de intercambio catiónico mostraron valores elevados en la mayoría de los sitios de evaluación. Se identificaron algunas limitantes químicas, principalmente en los municipios de Montelíbano y Puerto Libertador. En general, los resultados indican que el área de estudio presenta condiciones edáficas adecuadas para el cultivo de cacao.

Palabras clave: compactación de los suelos, fincas cacaoteras, producción agrícola, *Theobroma cacao* L.

SUMMARY

The municipalities located in the southern region of Córdoba exhibit high potential for the development of cacao cultivation (*Theobroma cacao* L.), whose productivity depends on specific edaphic conditions. In this context, it is essential to assess whether the soils in southern Córdoba meet the optimal conditions for the establishment and growth of the crop. This study aimed to characterise the physico-chemical properties of cacao-growing soils and to identify their main limitations. The research was conducted in 2022 across four municipalities—Tierralta, Valencia, Montelíbano, and Puerto Libertador—where 111 cacao farms of varying ages (5 to 25 years) were assessed using a quantitative approach, including field and laboratory evaluations of soil physico-chemical parameters. No signs of compaction were observed, which was consistent with low bulk density (Da) values; the predominant textural class was clay loam (F-Ar). The soil pH presented slightly acidic values that were restrictive for cacao cultivation in Montelíbano and Puerto Libertador.



Cita recomendada:

Contreras-Santos, J. L., Martínez-Atencia, J., Falla-Guzmán, C. K., Rodríguez-Vitola, J. L., & Garrido-Pineda, J. (2026). El Cultivo de Cacao: Evaluación de la Fertilidad y Principales Limitantes Edáficos, Sur de Córdoba - Colombia. *Terra Latinoamericana*, 44, 1-16. e2229. <https://doi.org/10.28940/terralatinoamericana.v44i.2229>

Recibido: 7 de febrero de 2025.

Aceptado: 10 de junio de 2025.

Artículo. Volumen 44.

Enero de 2026.

Editor de Sección:

Dr. Luis Alonso Valdez Aguilar

Editor Técnico:

Dr. José Gregorio Joya Dávila



Copyright: © 2026 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/>).

Phosphorus (P) content was low ($<15 \text{ mg kg}^{-1}$), with high variability ($\text{CV} > 100\%$). Organic matter showed medium to high levels, and cation exchange capacity (CEC) values were high across most of the evaluated sites. Some chemical limitations were identified, mainly in Montelíbano and Puerto Libertador. Overall, the results suggest that the study area presents suitable edaphic conditions for cacao cultivation.

Index words: soil compaction, cocoa farms, agricultural production, *Theobroma cacao* L.

INTRODUCCIÓN

El cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L) en Colombia ha ganado un espacio importante en la economía campesina, por su rentabilidad y adaptación agroecológica, lo que ha convertido a este cultivo en una estrategia del gobierno, no solo para la sustitución de cultivos ilícitos, sino también para disminuir procesos de deforestación (Montealegre-Bustos, Rojas y Jaimes, 2021; Charry, Castro y Castro, 2019; Cely-Torres, 2017).

En el departamento de Córdoba, para el año 2021 se reportó un área sembrada de 2.155 ha de cacao, que representó el 1.66% de la producción nacional. Respecto al rendimiento, Córdoba alcanzó los mayores indicadores productivos después de Huila y Meta, con un promedio de 0.62 kg ha^{-1} , concentrándose principalmente en cuatro municipios: Tierralta, Valencia, Montelíbano y Puerto Libertador (UPRA, 2021). Aunque este valor de rendimientos por unidad de área supera los promedios nacionales e internacionales (0.51 y 0.48 kg ha^{-1}) (Montealegre-Bustos *et al.*, 2021), siguen siendo bajos considerando el potencial de los genotipos de cacao utilizados en la región (Agudelo-Castañeda, Antolinez, Báez, Jaimes y Romero, 2023). Entre los factores que inciden en este comportamiento se encuentran el manejo agronómico, áreas con bajo potencial edáfico climático para su establecimiento y nutrición inadecuado de las plantaciones (Amponsah-Doku, Daymond, Robinson, Atuah y Sizmur, 2022; Arthur *et al.*, 2022).

Con el fin de mitigar los factores, es urgente identificar las propiedades fisicoquímicas del suelo que afectan el rendimiento del cacao, de manera que se puedan generar planes de manejo de fertilidad de suelo por localidad y predio (De Caires, Wuddivira y Bekele, 2015; Yao *et al.*, 2014). En plantaciones de cacao se ha documentado que la baja productividad suele estar asociada a limitantes edáficas y nutrimentales, por lo que el diagnóstico de fertilidad del suelo es un paso clave para orientar la nutrición del cultivo (Francisco-Santiago, Palma, Sánchez, Obrador y García, 2023). Comprender el comportamiento de las propiedades en un contexto espaciotemporal diferencial permite generar planes de manejo de fertilidad de forma específica (Quaye *et al.*, 2021). Además, el uso de herramientas geoespaciales para identificar áreas con mayor potencial productivo contribuye a garantizar la sostenibilidad económica, productiva y ambiental del sistema, facilitando la transición hacia una agricultura de precisión o por sitio específico (De Assis Silva *et al.*, 2022; Quaye *et al.*, 2021).

Caracterizar las propiedades fisicoquímicas de los suelos cacaoteros del departamento de Córdoba es fundamental para optimizar la fertilización en plantaciones existentes e identificación de zonas con alto potencial edafológico para nuevos establecimientos. Reducir esta brecha de conocimiento mediante herramientas ágiles y adaptadas a la realidad regional ofrece soporte técnico en el corto y mediano plazo a los productores, fortaleciendo así la sostenibilidad de los sistemas productivos. En concordancia con lo anterior, el presente estudio tuvo como objetivo caracterizar las propiedades fisicoquímicas de los suelos cacaoteros e identificar sus principales limitaciones edáficas en los municipios evaluados en el sur del departamento de Córdoba.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitios de Estudio

La investigación se desarrolló en cuatro municipios del sur del departamento de Córdoba con vocación cacaotera (Cuadro 1). El clima en esta región es cálido y corresponde a la zona de vida de bosque húmedo tropical (bh-T) (Holdridge, 1982).

El área de estudio evaluada presenta cinco tipos de paisajes según la clasificación ambientes morfogenéticos representativos: 1. Planicies aluviales, piedemonte coluvie - aluvial; 2. Lomerío erosional estructural; 3. Lomerío fluviogravitacional; y 4. Montaña estructural erosional. El relieve varió desde planicies de inundación, terrazas, Vallesitos aluvio - coluviales y abanicos hasta lomas, colinas, filas y vigas (Anexo 1; IGAC, 2009).

Cuadro 1. Ubicación y condición climática de los municipios cacaoteros del sur del departamento de Córdoba
Table 1. Location and climatic conditions of the cocoa-producing municipalities in the south of the department of Córdoba

Municipio	Tierralta	Valencia	Montelíbano	Puerto Libertador
Coordenadas	N 8° 10' 22" O 76° 03' 34"	N 8° 15' 33" O 76° 08' 33"	N 7° 58' 16" O 75° 25' 05"	N 7° 53' 17" O 75° 40' 18"
Altitud	51 m de altitud	55 m de altitud	49-1330 m de altitud	90 m de altitud
Temperatura Promedio	26.6 °C	28 °C	28 °C	27 °C
Humedad relativa	83%	83%	80%	87%
Precipitación acumulativa anual	1949mm	1999mm	2419 mm	2587mm

Fuente: Elaboración propia.
 Source: Own elaboration.

Tamaño de Muestra

Para la conformación del marco muestral, se consultó la base de datos de la Federación Nacional de Cacaoteros (Fedecacao), que reportó un total de 2686 hectáreas (ha) sembradas con cacao en Córdoba, correspondiente a 1720 familias productoras. La distribución de predios por municipio fue: Tierralta (990), Valencia (435), Puerto Libertador (195) y Montelíbano (100). A partir de este universo, se estimó el tamaño de muestra aplicando la ecuación 1, con base en el estudio exploratorio de Cadena-Torres, Novoa, Grandett, Contreras y Agamez (2021).

$$n = \frac{Z^2 N p q}{p q Z^2 + (N - 1) e^2} \quad (1)$$

En donde: Z = Coeficiente para un nivel de confianza del 95% (1,96); N = tamaño de la población muestral (1720 predios); e = Error máximo admisible, se asumió en 9%.

p = Proporción de predios que poseen pérdidas de la capacidad productiva; q: Proporción de predios que no poseen pérdida de la capacidad productiva. Debido a que no se conocía la varianza de la población objetivo, se asumió la mayor varianza posible, considerando los valores de p = q = 50%.

La aplicación de la fórmula arrojó un tamaño muestral de 111 predios, equivalente al 6.45% de la población cacaotera del departamento de Córdoba (Cuadro 2).

Posteriormente, se establecieron rutas de muestreo orientas según los puntos cardinales para asegurar representatividad espacial (Figura 1).

Cuadro 2. Distribución de puntos de muestreo de suelo en los municipios de Tierralta, Valencia, Puerto Libertador y Montelíbano en el departamento de Córdoba, Colombia.
Table 2. Distribution of soil sampling points in the municipalities of Tierralta, Valencia, Puerto Libertador, and Montelíbano in the department of Córdoba, Colombia.

Municipio	Tamaño de población	Tamaño de la muestra	Porcentaje
	N	n	%
Tierralta	990	50	45
Valencia	435	25	23
Puerto Libertador	195	18	16
Montelíbano	100	18	16
Población total	1720	111	100

Fuente: Fedecacao Córdoba, comunicación personal.
 Source: Fedecacao Córdoba, personal communication.

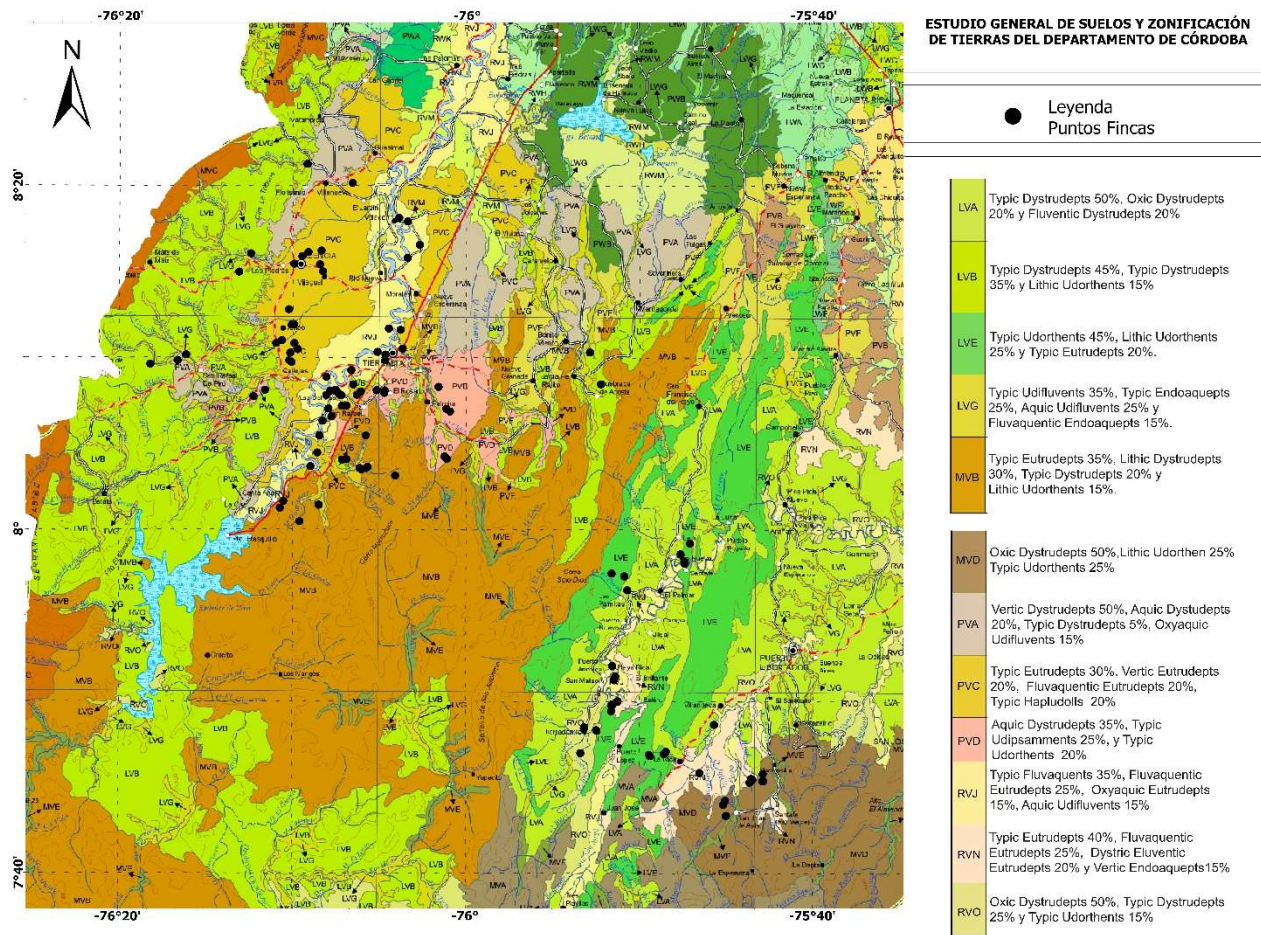


Figura 1. Distribución de puntos de muestreo de parámetros edáficos en fincas cacaoteras del sur del departamento de Córdoba. 2022.
Figure 1. Distribution of sampling points of edaphic parameters in cocoa farms in the south of the department of Córdoba. 2022.

Se seleccionaron las fincas en etapa productiva con diferentes tiempos de establecimiento (5, 10, 15 y 20 años), lo que permitió abordar diversas estrategias de manejo. El muestreo se llevó a cabo entre octubre y diciembre de 2022, periodo de pico productivo del cultivo en la región. El 81% de las fincas evaluadas había aplicado fertilizantes de síntesis química (UREA, KCl, DAP, TRIPLE 15, AGRIMINS, AGROCAFÉ, NUTRICAMPO, RAFOS, AGROPLAN) en los últimos dos años. El 100% de los predios utilizó cal agrícola como estrategia para regular la humedad del suelo.

Muestreo de Suelo

En cada predio delimito un área de una hectárea, identificando un punto central para establecer un área de monitoreo de 2500 m² (50 m × 50 m). En esta área se excavaron tres calicatas de observación de 0.30 m × 0.30 m (Figura 2).

Parámetros Evaluados

Se determinaron parámetros físicos de suelo como la distribución de partículas en el suelo (textura) con el método de Bouyoucos (IGAC, 2006) y la densidad aparente (Da) por medio del método del cilindro de volumen conocido (ecuación 2) (Burt, 2014).

$$Da = \frac{M_{ss}}{V_c} \quad (2)$$

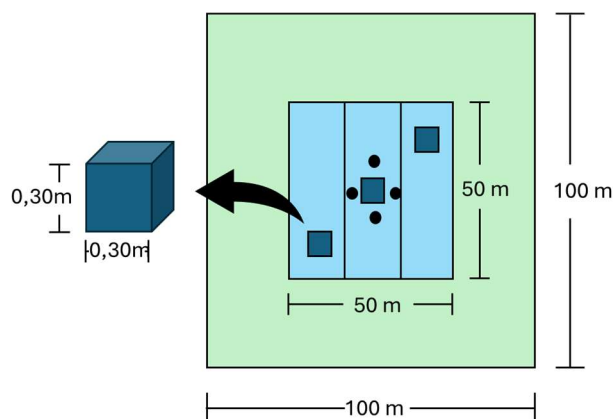


Figura 2. Malla muestral de parámetros fisicoquímicos de suelo en sistemas de producción de cacao, sur de Córdoba 2022.
Figure 2. Sample mesh of soil physicochemical parameters in cocoa production systems, south of Córdoba 2022.

Donde: Mss = masa de suelo seco expresada en gramos (g) determinada a una temperatura de 105 °C durante 24 horas; Vc = volumen conocido del cilindro.

La densidad real del suelo (D_r), se determinó por medio del método del picnómetro (Burt, 2014); la porosidad total del suelo se determinó de manera indirecta usando la relación de D_a y D_r (ecuación 3), descrita por Bernabé y Mainault (2015).

$$Pt = \left(1 - \left(\frac{D_a}{D_r} \right) \right) \times 100 \quad (3)$$

La estabilidad estructural se determinó por medio de método de tamizado en húmedo (Yoder), en muestra disturbada (IGAC, 2006). El diámetro medio ponderado (DMP) se calculó usando la ecuación 4 descrita por Zhao et al. (2017).

$$DMP = \frac{\sum_{i=1}^6 d_i \times w_i}{w} \quad (4)$$

Donde: DMP = diámetro medio ponderado; d_i = es el promedio de tamaño i -ésima parte de la fracción de agregado; w_i = es la masa de la fracción retenida de i -ésima del agregado y w = es la masa total de toda la fracción de tamaño de agregados. $i = 1, 2, \dots, 6$ representa el tamaño de agregados >4 mm, 4~2 mm, 2~1 mm, 1~0.5 mm, 0.5~0.25 mm y < 0.25 mm.

Los parámetros químicos de suelo evaluados fueron: Contenido de materia orgánica por el método de oxidación (MO) (Walkley y Black, 1934); pH, determinado por método potenciométrico, con relación 1:1 P / V (IGAC, 2006); Fósforo disponible (P) se determinó por medio del método de Bray II modificado y cuantificado por reducción de ácido ascórbico (Bray y Kurtz, 1945); las bases de intercambio catiónico calcio (Ca), potasio (K), magnesio (Mg) y sodio (Na) se determinaron por medio del espectrofotometría de absorción y emisión atómica (Chapman, 1965); Hendershot, Lalonde y Duquette, 2006); los elementos menores (Cu, Fe, Zn, Mn) se determinaron a través de metodología de extracción por doble ácido diluido y determinados por absorción atómica (IGAC, 2006).

Análisis Estadístico

Los datos experimentales se presentaron como medias \pm desviación estándar. Para el caso de los parámetros fisicoquímicos de suelo se aplicó estadístico descriptivo mostrando el comportamiento por municipio evaluados (Freeman, Gomez y Gomez, 1985). Se utilizó la prueba de Kolmogorov-Smirnov ($p < 0.05$) para comprobar la normalidad de los datos. Posterior se realizó un análisis de variancia (ANOVA) sobre todos los parámetros edáficos

evaluados mediante el software Rstudio (R Core Team, 2021) con la finalidad de realizar un análisis comportamiento entre municipios. En caso de detectarse diferencia significativa ($p < 0.05$), las medias se separaron empleando la prueba de Tukey (HSD). Se realizó análisis de correlaciones de Pearson ($p < 0.05$) entre los parámetros de suelo evaluados. Con el fin de reducir el número de variables se empleó análisis de componentes principales (CP), sometidos al método de rotación ortogonal (varimax) o varianza máxima. Se seleccionaron los CP que presentaron valores propios superiores a uno (Kaiser, 1960). En cada componente se seleccionaron los vectores con mayor valor absoluto y que estuvieran 10% por debajo del valor absoluto (Cherubin *et al.*, 2016). Los CP que presentaron más de un vector, se validaron las posibles correlaciones entre vectores por medio de un análisis de correlación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Propiedades Físicas del Suelo en Sistemas de Producción de Cacao

Los valores promedios de las propiedades físicas del suelo se presentan en el Cuadro 3. La densidad aparente (Da) mostro un comportamiento diferencial entre municipios ($p < .0001$), con valores más altos en el municipio de Valencia ($1.37 \pm 0.09 \text{ g cm}^{-3}$) y Tierralta ($1.36 \pm 0.11 \text{ g cm}^{-3}$), y menores en Puerto Libertador y Montelíbano. El coeficiente de variación (CV) de Da oscilo entre 6.89 a 15.11%. La porosidad total (Pt) presento una distribución a la de Da, con media general que vario de $44.88 \pm 3.51\%$ (Valencia) hasta $53.66 \pm 6.71\%$ (Puerto Libertador). El diámetro medio ponderado (DMP) mostró comportamiento significativo entre municipios ($p = 0.0031$), siendo mayor en Puerto Libertador ($1.1 \pm 0.66 \text{ mm}$) y menor en Montelíbano ($0.54 \pm 0.5 \text{ mm}$). En cuanto a la distribución de partículas del suelo (arenas, arcillas y limos), no se observó comportamiento significativo entre los municipios, predominando el grupo textural Franco Arcillosa (F-Ar). En el caso de las arenas (A), se observó variación de A entre 4.82% (Tierralta) a 76.03% (Valencia); el contenido de arcilla (Ar) entre 5.28% (Montelíbano) a 58.74% (Tierralta); y el contenido de limo (L) 7.34% (Valencia) a 56.86% (Tierralta).

Propiedades Químicas del Suelo (Macroelementos y Microelementos)

El pH del suelo mostró comportamiento diferencial ($p < 0.0001$) en el área de estudio, con variación de media de 5.62 ± 0.39 (moderadamente ácido) y 6.4 ± 0.36 (ligeramente ácido). Los valores más bajos se obtuvieron en Montelíbano y Puerto Libertador. El CV varió entre 5.66% a 11.8% (Cuadro 3). La conductividad eléctrica (CE) presento un rango de $0.24 \pm 0.08 \text{ dS cm}^{-1}$ a $0.34 \pm 0.16 \text{ dS cm}^{-1}$, siendo Puerto Libertador donde se registró el mayor valor. El CV fue superior a 32% lo que indica una alta dispersión de los datos. El contenido de materia orgánica (MO vario significativamente entre municipios ($p = 0.0261$), con mayor valor en Puerto Libertador ($2.99 \pm 1.09\%$). Tierralta, Valencia y Montelíbano presentaron valores similares (2.48 ± 0.64 , 2.48 ± 0.74 y 2.25 ± 0.59 , respectivamente). El contenido de fósforo (P) y azufre (S), no presentaron comportamiento significativo entre municipios ($p > 0.05$) (Cuadro 3). Los mayores valores de P se encontraron en Valencia y Montelíbano (11.46 ± 12.54 y $10.13 \pm 14.6 \text{ mg kg}^{-1}$, respectivamente), con coeficiente de variación (CV) superiores a 100%.

Las bases de intercambio catiónico, Calcio (Ca), mostro comportamiento diferencial entre municipios ($p = 0.009$), con valores más altos en Valencia ($13.27 \pm 3.69 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$) y Puerto Libertador ($11.19 \pm 5.3 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$). Los valores máximos y mínimos de Ca en fincas cacaoteras se observaron en Puerto Libertador ($27.65 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$) y Tierralta ($2.37 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$), respectivamente. El contenido de Magnesio (Mg) en el suelo no presentó comportamiento diferencial entre los municipios ($p > 0.05$), con valores promedios más altos en Valencia ($5.77 \pm 2.33 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$). El contenido de potasio (K) presentó un comportamiento diferencial entre municipios ($p = 0.0011$), encontrando el mayor contenido en Valencia ($0.41 \pm 0.14 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$) y menor en Montelíbano ($0.24 \pm 0.16 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$). La capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICe), no evidenció diferencias significativas entre los municipios evaluados ($p = 0.0509$). Los mayores valores promedio oscilaron entre $15.58 \pm 6.76 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ (Tierralta) y $19.6 \pm 5.48 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ (Valencia).

Los microelementos del suelo (Fe, Cu, Mn, Zn y B) evidenciaron comportamiento diferencial ($p < 0.05$) entre los municipios, excepto el zinc (Zn, $p > 0.05$). El contenido de hierro (Fe) fue más elevado en Montelíbano ($139.02 \pm 68.21 \text{ mg kg}^{-1}$) y más bajo en Valencia ($77.91 \pm 27.32 \text{ mg kg}^{-1}$). El cobre (Cu) y el manganeso (Mn) fueron más elevados en Puerto Libertador ($9.14 \pm 7.41 \text{ mg kg}^{-1}$ y $16.44 \pm 12.50 \text{ mg kg}^{-1}$, respectivamente). El contenido de boro (B) presento su nivel más elevado en Valencia ($0.4 \pm 0.13 \text{ mg kg}^{-1}$).

Cuadro 3. Características fisicoquímicas del suelo bajo el sistema de producción cacao en el área de estudio.
Table 3. Physicochemical characteristics of the soil under the cocoa production system in the study area.

Parámetros de suelo		Municipio											Sig	
		n=111												
		Montelíbano			Puerto Libertador			Tierralta			Valencia			
		med±str	rango	CV	med±str	Rango	CV	med±str	rango	CV	med±str	rango	CV	
Da	g cm ⁻³	1.17±0.14	1.46-0.92	11.92	1.13±0.17	1.49-0.87	15.11	1.36±0.11	1.56-1.1	8.02	1.37±0.09	1.59-1.2	6.89	<.000
Pt	%	52.44±5.23	61.3-41.8	9.98	53.66±6.71	63.4-40.91	12.51	45.42±4.15	54.1-36.24	9.14	44.88±3.51	52.18-38.23	7.83	<.000
DMP	mm	0.54±0.5	1.81-0.09	92.67	1.1±0.66	2.05-0.13	60.23	0.68±0.5	1.98-0.08	72.8	0.55±0.42	1.64-0.08	75.98	0.003
A		36.76±18.94	72.51-10.47	51.54	29.56±11.1	54.15-13.07	37.54	28.15±17.18	76.03-4.66	61.03	28.36±12.75	54.82-4.82	44.97	0.232
Ar	%	28.55±14.35	51.14-5.28	50.28	37.54±12.94	56.21-15.44	34.47	33.25±11.56	52.47-7.77	34.76	32.89±11.27	58.74-14.96	34.26	0.188
L		34.69±9.68	51.04-18.17	27.89	32.9±10.13	53.03-14.23	30.8	38.61±9.09	54.78-16.2	23.55	38.76±7.34	56.86-26.86	18.94	0.066
Textura		F-Ar			F-Ar			F-Ar			F-Ar			
pH		5.62±0.39	6.41-5.16	6.94	5.78±0.41	6.52-4.63	7.1	6.19±0.73	7.67-4.76	11.8	6.4±0.36	7.09-5.64	5.66	<.000
CE	dS cm ⁻¹	0.31±0.12	0.69-0.21	38.97	0.34±0.16	0.72-0.14	46.5	0.24±0.08	0.46-0.13	33.78	0.33±0.11	0.68-0.21	32.93	0.001
MO	%	2.25±0.59	3.36-1.19	26.04	2.99±1.09	4.83-1.29	36.55	2.48±0.64	4.1-1.24	25.84	2.48±0.74	3.98-1.6	29.76	0.026
P	mg kg ⁻¹	10.13±14.6	64.17-2	144.08	7.37±6.68	23.52-1.29	90.69	9.08±6.91	30.65-1.29	76.14	11.46±12.54	55.64-2.82	109.48	0.581
S		11.28±12.69	59.44-3.42	112.57	10.44±17.65	80.21-2.03	169.06	5.62±3.01	21.97-2.77	53.53	6.14±2.64	14.2-2.88	43	0.056
Ca	cmol kg ⁻¹	10.14±3.62	19.16-4.56	35.73	11.19±5.3	27.65-3.17	47.36	9.9±4.53	17.88-2.37	45.75	13.27±3.69	20.73-6.96	27.82	0.009
Mg		5.07±1.79	8.62-2.23	35.34	5.24±2.87	12.96-1.47	54.71	5.11±2.59	10.65-0.59	50.68	5.77±2.33	11.32-2.75	40.45	0.705
K		0.24±0.16	0.74-0.09	67.08	0.25±0.16	0.73-0.11	65.92	0.28±0.19	1.29-0.09	68.12	0.41±0.14	0.64-0.15	33.31	0.001
ClCe		15.84±5.09	28.6-8.03	32.13	16.83±7.75	40.92-5.98	46.04	15.58±6.76	25.36-3.68	43.39	19.6±5.48	29.99-9.98	27.94	0.051
Fe		139.02±68.21	290-54.67	49.06	79.45±28.68	136.62-36.01	36.1	105.96±61.08	330.53-31.9	57.65	77.91±27.32	152.16-44.76	35.07	0.001
Cu		3.83±1.32	6.4-1.74	34.41	9.14±7.41	29.0-2.34	81.1	4.14±1.42	6.98-1	34.21	4.27±1.29	8.07-2.31	30.2	<.000
Mn	mg kg ⁻¹	8.61±3.43	14.94-3.37	39.9	16.44±12.50	148.61-2.98	76.06	7.82±6.71	30.39-2.11	85.74	4.66±2.98	14.77-1.5	63.88	<.000
Zn		1.86±0.69	3.46-1	36.98	1.79±1.55	7.28-1	86.68	2.35±1.96	10.87-1	83.34	2.52±2.62	14.14-1	103.95	0.510
B		0.22±0.13	0.38-0.02	58.03	0.29±0.05	0.4-0.21	16.62	0.39±0.13	0.64-0.1	33.59	0.4±0.13	0.59-0.18	32.28	<.000

** parámetros evaluados Da = densidad aparente (g cm⁻³); Pt = porosidad total (%); DMP = diámetro medio ponderado (mm); A = arenas (%); Ar = arcillas (%); L = Limos (%); CE = conductividad eléctrica del suelo (dS cm⁻¹); MO = contenido de materia orgánica (%); P = contenido de fósforo (mg kg⁻¹); S = contenido de azufre (mg kg⁻¹); Ca = calcio intercambiable (cmol kg⁻¹); Mg = contenido de magnesio intercambiable (cmol(+) kg⁻¹); K = contenido de potasio intercambiable (cmol(+) kg⁻¹); ClCe = capacidad de intercambio catiónico efectiva (cmol(+) kg⁻¹); Fe = contenido de hierro en el suelo (mg kg⁻¹); Cu = contenido de cobre (mg kg⁻¹); Mn = contenido de manganeso en el suelo (mg kg⁻¹); B = contenido de boro (mg kg⁻¹); Sig. = significancia $p < 0.05$; med±str = media ± desviación estándar.

** evaluated parameters Da = bulk density (g cm⁻³); Pt = total porosity (%); DMP = weighted mean diameter (mm); A = sands (%); Ar = clays (%); L = silts (%); EC = soil electrical conductivity (dS cm⁻¹); OM = organic matter content (%); P = phosphorus content (mg kg⁻¹); S = sulfur content (mg kg⁻¹); Ca = exchangeable calcium (cmol kg⁻¹); Mg = exchangeable magnesium content (cmol(+) kg⁻¹); K = exchangeable potassium content (cmol(+) kg⁻¹); ECEC = effective cation exchange capacity (cmol(+) kg⁻¹); Fe = soil iron content (mg kg⁻¹); Cu = copper content (mg kg⁻¹); Mn = soil manganese content (mg kg⁻¹); B = boron content (mg kg⁻¹); Sig. = significance $p < 0.05$; mean±SD = mean ± standard deviation.

Correlación entre las propiedades fisicoquímicas del suelo evaluadas

La relación entre las propiedades del suelo se evaluó mediante una matriz de correlación de Pearson (Figura 3). Se evidenciaron correlaciones negativas altamente significativas ($p < 0.0001$) entre la densidad aparente (Da) y el contenido de arcilla (Ar), conductividad eléctrica (CE), materia orgánica (MO), cobre (Cu) y manganeso (Mn); así como correlación positiva y significativa ($p < 0.0001$) con el contenido de boro (B). La porosidad total (Pt) mostro comportamiento similar a Da, con correlación significativa ($p < 0.05$) positiva con MO, Ar, CE, Cu, Mn y negativa con B (Figura 3).

El diámetro medio ponderado (DMP) se correlacionó de forma altamente significativa con el contenido de arcilla (Ar, $r = 0.58$), MO ($r = 0.46$) y Mn ($r = 0.33$). El contenido de arena (A) mostró correlación inversa significativa con Ar ($r = -0.82$), limos (L, $r = -0.63$) y con las bases de intercambio (Ca, Mg y K) ($r = -0.48$; -0.57

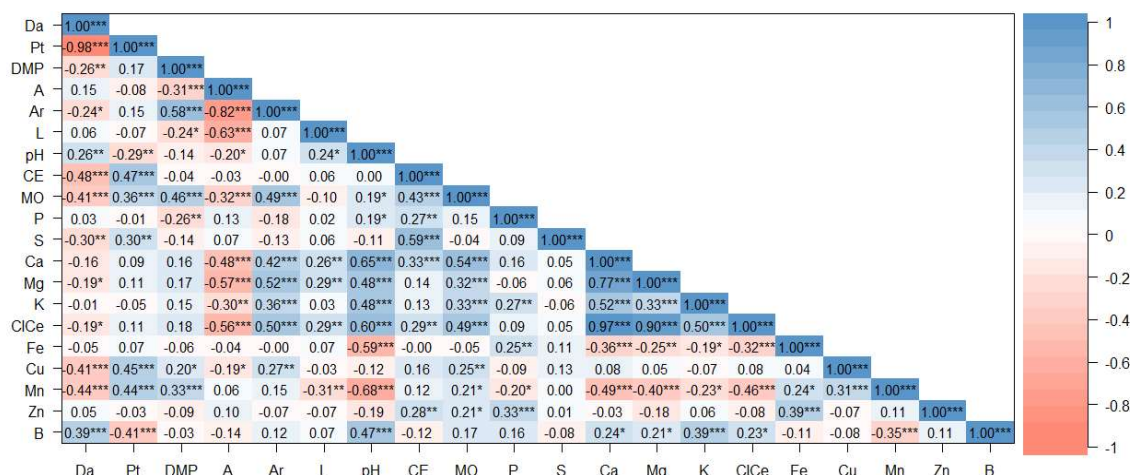


Figura 3. Análisis de correlación de Pearson entre parámetros de suelo en sistemas de producción de cacao en el sur del departamento de Córdoba (* significativo ($p < 0.05$), **significancia alta ($p < 0.001$) y * altamente significativo ($p < 0.0001$)).**

Figure 3. Pearson correlation analysis between soil parameters in cocoa production systems in the south of the department of Córdoba (* significant ($p < 0.05$), **high significance ($p < 0.001$) and * highly significant ($p < 0.0001$)).**

y -0,30, respectivamente). El contenido de arcilla (Ar) presentó correlación positiva significativa con MO ($r = 0.49$) y con las bases de intercambio catiónico (Ca, Mg y K) ($r = 0.42$; 0.52 ; 0.36 , respectivamente). Respecto al contenido de limo (L) se observaron correlaciones significativas positivas con pH ($r = 0.24$) y negativas con el contenido de Mn ($r = -0.31$).

El pH del suelo presentó correlaciones altamente significativas con el Ca ($r = 0.65$), Mg ($r = 0.48$), K ($r = 0.48$) y B ($r = 0.47$), así como correlaciones negativas con Fe ($r = -0.59$) y Mn ($r = -0.68$). La conductividad eléctrica (CE) mostró correlaciones directas y significativas con MO ($r = 0.43$), S ($r = 0.59$) y en menor proporción con el contenido de Ca y Zn (Figura 3). La materia orgánica (MO) se correlacionó de forma altamente significativa con el contenido de bases intercambiables (Ca, Mg y K) ($r = 0.54$; 0.32 y 0.49 , respectivamente) y, en menor grado con Cu ($r = 0.25$), Mn y Zn ($r = 0.21$). El contenido de fósforo (P) se correlacionó con el contenido de Zn ($r = 0.33$), Mg ($r = 0.27$) y Fe ($r = 0.25$), y de forma inversa con el contenido de Mn.

El calcio intercambiable (Ca) presentó correlaciones positivas con Mg y K, y negativas con Cu y Fe (Figura 3). El Mg se correlacionó positivamente con K ($r = 0.33$) e inversa con Mn ($r = -0.40$) y Fe ($r = -0.25$). El potasio (K) se correlacionó positiva con B ($r = 0.39$) e inversas con Mn y Fe. La capacidad de intercambio catiónico efectiva (ClCe) mostro correlación directa con Ca, Mg y K. En cuanto a los elementos menores, Fe se correlacionó de forma directa y altamente significativa con Zn ($r = 0.31$) y Mn ($r = 0.24$); el Cu se correlacionó de forma directa con Mn ($r = 0.31$), mientras que el Mn se correlacionó de forma significativa e inversa con el contenido de B ($r = -0.35$) (Figura 3).

Identificación de Principales Limitantes Físicoquímicas de Suelo

Se evaluaron 20 propiedades físicoquímicas de suelo, agrupadas en 7 parámetros físicos y 13 químicos (Cuadro 4). Los resultados del análisis de componentes principales (ACP) mostraron que solo cinco componentes principales con autovalores superiores a 1 explicaron el 73.66% de la varianza total acumulada, siendo CP1 y CP2 los que más contribuyeron (Cuadro 4).

El componente principal uno (CP1) explicó el 26.09% de la varianza, con mayores aportes de propiedades químicas capacidad de intercambio catiónico efectiva (ClCe) y contenido de calcio (Ca). El CP2 explicó el 19.08%, con mayor contribución de las propiedades físicas densidad aparente (Da) y porosidad total (Pt). El CP3 explicó el 11.51%, con mayor peso para la variable conductividad eléctrica (CE) y contenido de fósforo (P). Los componentes 4 y 5 explicaron el 16.89% (CP4 = 8.98% y CP5 = 7.99%), con mayores en el contenido de zinc (Zn, CP4) y contenido de limos (L, CP5) (Cuadro 4).

Cuadro 4. Análisis de componentes principales (ACP) de parámetros fisicoquímicos de suelo en sistemas de producción de cacao en el sur del departamento de Córdoba.**Table 4. Principal component analysis (PCA) of soil physicochemical parameters in cocoa production systems in the south of the department of Córdoba.**

Componente	[†] CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
Autovalor	2.2843	1.9533	1.5173	1.34065	1.26443
Varianza (%)	0.2609	0.1908	0.1151	0.08987	0.07994
Acumulado (%)	26.09	45.17	56.68	65.665	73.659
Da	0.089	-0.441	0.104	-0.171	0.058
Pt	-0.052	0.437	-0.135	0.186	-0.054
DMP	-0.124	0.218	0.362	-0.201	-0.188
A	0.300	-0.077	-0.233	0.050	-0.450
Ar	-0.276	0.171	0.333	-0.197	0.127
L	-0.146	-0.096	-0.045	0.178	0.606
pH	-0.287	-0.287	-0.093	0.103	-0.198
CE	-0.119	0.242	-0.445	0.033	-0.037
MO	-0.254	0.229	-0.042	-0.302	-0.205
P	-0.037	-0.063	-0.433	-0.302	0.019
S	-0.007	0.155	-0.370	0.234	0.102
Ca	-0.405	-0.030	-0.114	0.042	-0.066
Mg	-0.368	-0.012	0.038	0.149	0.085
K	-0.265	-0.076	-0.067	-0.247	-0.163
ClCe	-0.416	-0.015	-0.060	0.069	-0.002
Fe	0.151	0.132	-0.097	-0.344	0.469
Cu	-0.061	0.277	0.066	0.061	0.002
Mn	0.172	0.372	0.165	-0.158	-0.059
Zn	0.046	0.044	-0.277	-0.499	0.110
B	-0.150	-0.244	-0.016	-0.297	-0.069
*Max (ABS)	0.416	0.441	0.445	0.499	0.606
Max (ABS)-10%	0.374	0.397	0.401	0.449	0.545

[†] CP = componentes principales; *rangos determinados para la selección de vectores de mayor importancia dentro de cada componente; Max (ABS) = valore absoluto máximo del vector; Max (ABS)-10% = valore absoluto máximo del vector menos el 10%.

[†] PC = principal components; *ranges determined for the selection of vectors of greatest importance within each component; Max (ABS) = maximum absolute value of the vector; Max (ABS)-10% = maximum absolute value of the vector minus 10%.

Se observó que los predios con mayor contribución a la varianza total se ubicaron principalmente en Puerto Libertador, destacando en la figura de CP por su coloración de rojo oscuro (predio 36) a rojo amarillento (predios 36, 35 y 33). En contraste, los predios con menor contribución (en tonalidades azules) se distribuyeron en la zona central del gráfico, incluyendo los predios 111 y 96 (Valencia), 24 y 28 (Puerto Libertador), 7 (Montelíbano) y 42 (Tierralta) (Figura 4A). Las variables fisicoquímicas que explican la varianza espacial, las más representativas se visualizaron en tonalidades rojo intenso a amarillo claro (Figura 4B). las propiedades químicas más relevantes fueron: capacidad de intercambio catiónico efectivo (ClCe), contenido de calcio (Ca) y magnesio (Mg) intercambiable, pH y el contenido de manganeso (Mn), mientras que las físicas fueron: la densidad aparente (Da), el porcentaje de poros totales (Pt), el contenido de Arena (A) y el contenido de arcilla (Ar). Las variables menos influyentes en la explicación de la varianza se mostraron en tonalidades amarillas a azules (Figura 4B).

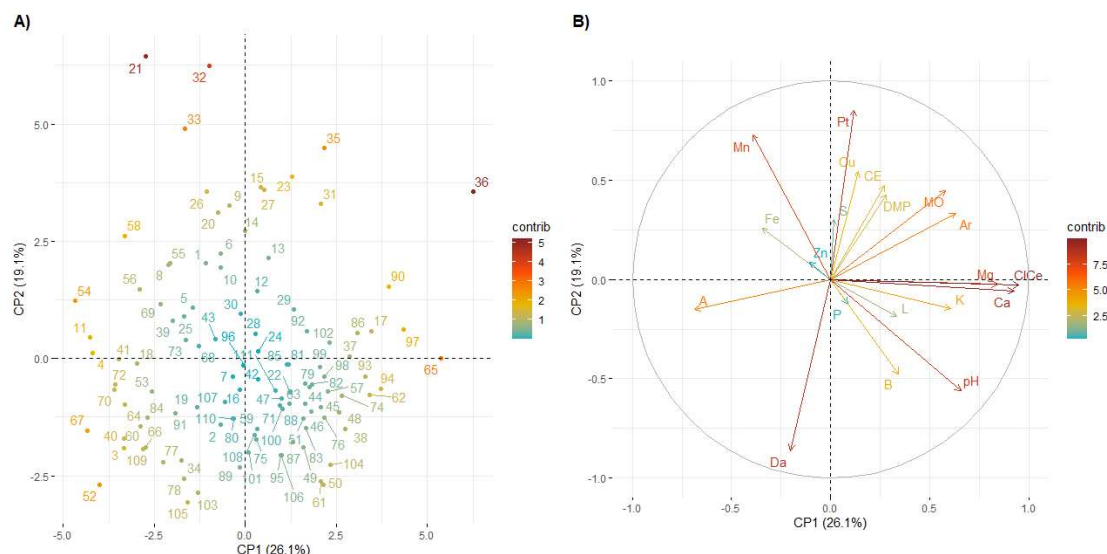


Figura 4. Contribución de los predios cacaoteros y parámetros físicos de suelo a la explicación de la varianza total.
Figure 4. Contribution of cocoa farms and physical soil parameters to the explanation of the total variance.

Los resultados obtenidos (Figura 5), permitieron inferir dependencias específicas entre propiedades del suelo y los municipios evaluados. En Montelíbano (MO) los predios se agruparon entre el cuadrante I y II, destacando como variables explicativas el contenido de micronutrientes Mn, Fe y Zn, además del contenido de S y, en menor medida, el porcentaje de poros totales (Pt). En Puerto Libertador (PU), las variables más determinantes fueron Pt, Cu, CE y DMP, con una contribución secundaria del azufre (S). En Tierralta y Valencia, los predios se distribuyeron entre los cuadrantes II, III y IV. En Tierralta y Valencia, las variables más relevantes fueron: Ca, Mg, K, pH y Boro (B), mientras que en Valencia, sobresalieron Da y contenido de arena (A).

Propiedades Físicas del Suelo en Sistemas de Producción de Cacao

Los resultados mostraron que los valores de densidad aparente (Da) asociados a los grupos texturales por municipio fueron, en general, inferiores a $1,4 \text{ g cm}^{-3}$, predominando el grupo textural franco arcilloso (F-Ar), condición considerada óptima para el desarrollo radicular en la profundidad evaluada (0-30 cm) (Burt, 2014). De los 111 predios evaluados, solo el 26% (29 fincas) presentaron valores entre 1.4 y 1.6 g cm^{-3} , asociados a texturas arcillosa (Ar), arcillo-limosa (Ar-L), franco (F), franco arcillo-arenosa (F-Ar-A) y franco arcillo-limosa (F-Ar-L). Aunque no se evidenciaron valores restrictivos para el crecimiento radicular, la porosidad total (Pt) fue superior al 50% únicamente en Montelíbano y Puerto Libertador, lo cual sugiere ausencia de compactación (Salamanca-Jiménez y Amézquita, 2015). Por el contrario, en Tierralta y Valencia, los valores de Pt fueron inferiores al 50%, condición que podría afectar la actividad biológica, la difusión de gases, el almacenamiento de agua y la capacidad de exploración radicular (Martínez-Atencia *et al.*, 2022; Xue *et al.*, 2023; Pires *et al.*, 2017).

En términos generales, aproximadamente el 72% de los predios evaluados mostraron algún grado de compactación, lo que podría estar limitando la absorción de nutrientes y, por consiguiente, afectando la productividad del cultivo por unidad de superficie (Osei-Gyabaah, Antwi, Addo y Osei, 2023). Los suelos sueltos, friables y bien drenados son ideales para el cultivo de cacao. En este estudio, el predominio de texturas franco-arcillosas favorece una distribución equilibrada de arena, limo y arcilla, mejorando la infiltración, retención de humedad, capacidad de intercambio catiónico y resistencia a la erosión, condiciones propicias para sistemas agroforestales con cacao (Osei-Gyabaah *et al.*, 2023).

Propiedades Químicas del Suelo

Los valores de pH oscilaron entre moderadamente ácido (> 5.6) y ligeramente ácido (6.1 a 6.5), rangos considerados adecuados para el cultivo de cacao (ICA, 1992). Estudios previos en Colombia indican que valores de pH superiores a 5.0 permiten un buen desarrollo del cultivo (León-Moreno, Rojas y Castilla, 2019). Otros autores sugieren que el intervalo óptimo es de 6.0 a 6.5 (Carmona-Rojas, Gutiérrez, Henao y Urrea, 2022; van Vliet y Giller, 2017; Snoeck, Koko, Joffre, Bastide y Jagoret, 2016).

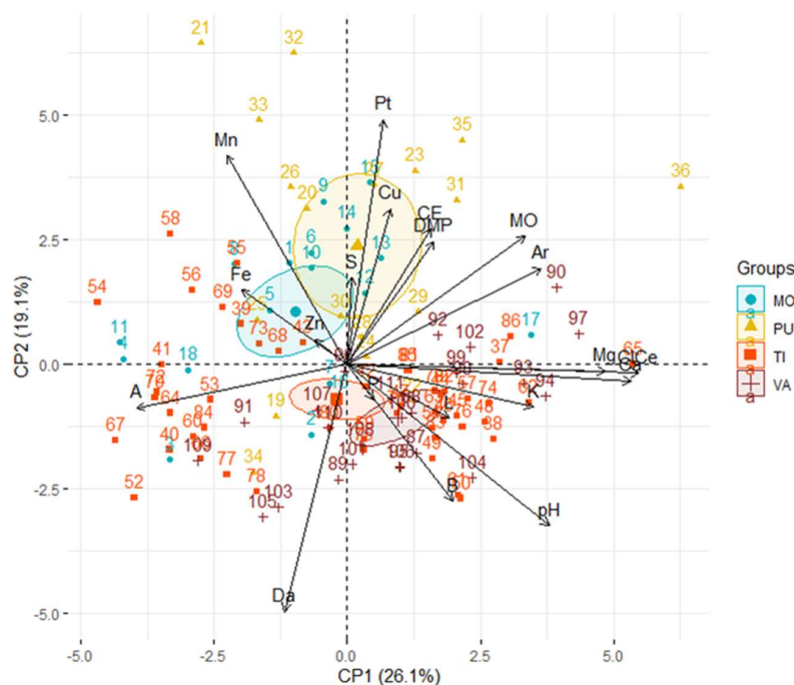


Figura 5. Principales factores fisicoquímicos de suelo determinantes en la varianza total por municipio.
Figure 5. Main physicochemical soil factors determining the total variance by municipality.

Los resultados en esta investigación mostraron que valores de pH inferiores a 5.0 en predios de Puerto Libertador (4.63) y Tierralta (4.76), condiciones que pueden afectar la disponibilidad de nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y micronutrientes (Kongor *et al.*, 2019; Rosas-Patiño, Puentes y Menjivar, 2019). La aplicación de enmiendas calcáreas (p. ej.: caliza, dolomita) ha demostrado mejorar la absorción de nitrógeno y aumentar la productividad del cultivo (Calle, Maldonado y Marza, 2023; Rosas-Patiño *et al.*, 2019).

La materia orgánica (MO) mostró valores de medios a altos para condiciones tropicales, siendo más elevados en Puerto Libertador (ICA, 1992). De acuerdo con los requerimientos del cultivo, valores de MO inferiores al 3% se consideran no aptos (Calle *et al.*, 2023; Calle, Mendoza y Miranda, 2021), lo que indica que se deben implementar estrategias de mejora para aumentar el contenido de materia orgánica en el área de estudio, por medio del uso de abonos verdes, coberturas y compuestos orgánicos procesados (p. ej.: Lombriabono, gallinaza, bioles, etc).

El contenido de fósforo disponible (P) fue generalmente bajo ($<20 \text{ mg kg}^{-1}$), clasificándose como insuficiente (ICA, 1992). De acuerdo con los requerimientos nutricionales del cultivo de cacao valores de $6\text{--}15 \text{ mg kg}^{-1}$ corresponden a una condición moderadamente apta, y $<5 \text{ mg kg}^{-1}$ a no apta. Solo el 14.41% de los predios presentó niveles óptimos. Dado que el P es esencial para el crecimiento y el desarrollo radicular (van Vliet y Giller, 2017; Snoeck *et al.*, 2016), e recomienda el uso de fuentes fosfatadas de bajo costo, como roca fosfórica, preferiblemente combinadas con dolomita, lo cual mejora la eficiencia del fósforo aplicado (Bolou-Bi, Ettien y Konan, 2023; Kongor *et al.*, 2019).

Las bases de intercambio (Ca, Mg y K) mostraron en general valores adecuados, especialmente Ca y Mg ($> 6 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ y $> 1.8 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$, respectivamente). El contenido de K fue moderado ($0.4\text{--}0.6 \text{ cmol kg}^{-1}$) (ICA, 1992) (Cuadro 3). En relación a los requerimientos nutricionales del cultivo de cacao reportados por diferentes autores se indica valores superiores a $4.1 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ de calcio, $0.9 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ de magnesio y $0.16 \text{ cmol kg}^{-1}$ de potasio son condiciones moderadas para el establecimiento del cultivo de cacao (Calle *et al.*, 2023, 2021; van Vliet y Giller, 2017), en nuestro caso el 92% de los predios presentó valores moderados de Ca, el 100 % valores moderados de Mg, y el 82% valores moderados de K. En Tierralta se observó el mayor número de fincas con limitaciones de Ca y Mg. Niveles adecuados de Ca son indispensables para el establecimiento del cultivo de cacao, mientras que el magnesio favorece la retención de hojas y disminuye la tasa de senescencia de las hojas (van Vliet y Giller, 2017). El potasio es altamente demandado durante la producción de cacao, y su déficit afecta la formación de frutos y la translocación de carbohidratos, así como la tolerancia al estrés hídrico (Carmona-Rojas *et al.*, 2022; van Vliet y Giller, 2017).

La capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE) se vió favorecida por el alto contenido de las bases de intercambio Ca, Mg y K en el suelo en el área de estudio, lo que propende por unos buenos indicadores productivos del cultivo (Kongor *et al.*, 2019; León-Moreno *et al.*, 2019). Los valores de CICE a nivel nacional en zonas productoras de cacao oscila entre 1.1 a 33.2 cmol kg⁻¹ con promedio de 8.8 cmol(+) kg⁻¹, en el área de estudio el promedio por municipio osciló entre 15.58 a 19.6 cmol(+) kg⁻¹, lo que indica que la concentración de bases de intercambio fue superior a las registradas a nivel nacional (León-Moreno *et al.*, 2019). Contrastando estos valores con los requeridos por el cultivo de cacao (> 12.1 cmol(+) kg⁻¹) se consideran zonas moderadamente aptas para el buen desarrollo del cultivo de cacao (Carmona-Rojas *et al.*, 2022; Calle *et al.*, 2021; van Vliet y Giller, 2017). Es importante mencionar que los macronutrientes nitrógeno, fósforo y potasio para el cultivo de cacao son los de mayor significancia para la formación del árbol y la conformación de los frutos (Carmona-Rojas *et al.*, 2022).

Los micronutrientes son de igual importancia que los macronutrientes en los procesos fisiológicos de las plantas (p. ej.: Mn se encarga de la transferencia de electrones, al igual que hace parte del sistema metabólico; el Zn y el B hacen parte del proceso de fructificación) (Rakshit, Singh y Sen, 2015). El Fe fue alto en Montelíbano y Tierralta, mientras que el Cu fue alto en Puerto Libertador, Tierralta y Valencia. El Mn fue alto en Puerto Libertador y medio en otros municipios. El Zn y B se mantuvieron entre bajo y medio, siendo los contenidos de Zn especialmente bajos (< 3 mg kg⁻¹) en toda el área de estudio (Cadena-Torres *et al.*, 2021; Contreras-Santos, Martinez, Cadena, Novoa y Tamara, 2020).

Principales Limitantes Físicoquímicos del Suelo Evaluadas

La identificación del conjunto mínimo de datos (CMD) capaz de explicar la variabilidad edáfica constituye una herramienta eficaz y rentable en la evaluación integral del suelo en sistemas cacaoteros, lo que contribuye en la identificación de las principales limitantes de suelo. En este estudio, el análisis de componentes principales (ACP) permitió la selección de variables explicativas claves como la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE), la densidad aparente (Da), la conductividad eléctrica (CE), el contenido de zinc (Zn) y de limo (L). Estos parámetros están directamente relacionados con la fertilidad y funcionalidad del suelo, con incidencia sobre la disponibilidad de nutrientes, la estructura del suelo y la retención de humedad (Visscher, Chavez, Caicedo, Tinoco y Pulleman, 2024).

Así mismo, los resultados obtenidos mostraron que los micronutrientes desempeñan un papel relevante en la identificación de limitantes químicas del suelo, especialmente en los municipios de Montelíbano y Puerto Libertador, ubicados en el Alto Sinú - zona San Jorge. En estos territorios, elementos como Mn, Cu, Fe y Al han sido reportados como promotores de acidez, lo cual afecta negativamente la disponibilidad de bases de intercambio como Ca, Mg y K (Njukeng y Baligar, 2016; Vanhove, Vanhoudt y Van Damme, 2016). Situación que ha sido referenciada ampliamente en suelos tropicales, donde la acidez elevada limita el desarrollo del sistema radicular y reduce la eficiencia de absorción de nutrientes esenciales (Adarme-Duran, Ágreda, Brandão y Castillo, 2024).

Otros estudios han destacado que el exceso de Mn y Fe puede inducir toxicidad en suelos fuertemente ácidos, lo que repercute en la fisiología del cultivo y en la reducción del rendimiento (Kongor *et al.*, 2019). En concordancia con lo anterior, la inclusión de micronutrientes como variables explicativas en el modelo multivariado sugiere que, su influencia en la dinámica edáfica y en la productividad del cacao puede ser considerable (Chinnappan, 2022; Visscher *et al.*, 2024).

Por otro lado, en los municipios de Tierralta y Valencia, las variables de mayor contribución estuvieron asociadas a las bases de intercambio (Ca, Mg y K), lo cual coincide con estudios que reportan que valores por debajo de los umbrales críticos (K < 0.3 cmol(+) kg⁻¹, Ca < 5 cmol(+) kg⁻¹ y Mg < 0.5 cmol(+) kg⁻¹) pueden afectar negativamente el rendimiento por hectárea año (Bai *et al.*, 2022; Calle *et al.*, 2023). Suelos con bajos contenidos de estas bases presentan limitaciones en la formación de estructuras estables, en la translocación de carbohidratos, y en la tolerancia del cultivo a condiciones de estrés (van Vliet y Giller, 2017; León-Moreno *et al.*, 2019).

CONCLUSIONES

Los suelos asociados al sistema de producción de cacao en el sur del departamento de Córdoba presentaron una alta heterogeneidad edáfica, con diferencias marcadas entre municipios en términos de propiedades físicas y químicas del suelo. Las texturas franco-arcillosas, combinadas con valores de densidad aparente generalmente inferiores a 1.4 g cm⁻³, indican buenas condiciones para el desarrollo radicular, aunque se identificaron signos de compactación moderada en algunas fincas, especialmente en Tierralta y Valencia, donde la porosidad total fue inferior al 50%.

Desde el punto de vista químico, la mayoría de los suelos variaron de moderadamente ácido a ligeramente ácido, condición normal o favorable para el desarrollo del cultivo de cacao. Sin embargo, en los municipios de Montelíbano y Puerto Libertador se identificaron predios con valores de pH inferiores a 5.0, lo que podría ser una limitante para el cultivo de cacao. La materia orgánica presentó valores de medios a altos, aportando estabilidad estructural, retención de humedad y mayor contenido de nutrientes. Los suelos del área de estudio presentaron valores superiores a los niveles críticos nutricionales requeridos por el cultivo de cacao, por lo tanto, se hace necesario implementar planes de manejo nutricional equilibrados, con la finalidad de garantizar estos niveles nutricionales, garantizando la producción de grano de cacao en estas áreas en el futuro.

El análisis de componentes principales (ACP) permitió identificar un conjunto mínimo de variables explicativas (CMD) conformado por: CICE, densidad aparente, CE, Zn y limo. Estas variables representaron los principales ejes de variabilidad en los suelos cacaoteros y permiten priorizar acciones correctivas. Adicionalmente, se evidenció que en Montelíbano y Puerto Libertador, elementos como Mn, Fe, Cu y Zn contribuyen a la acidez del suelo y podrían estar incidiendo en la deficiencia de las bases de intercambio. En contraste, en Tierralta y Valencia, las principales limitantes se asociaron a bajas concentraciones de Ca, Mg y K.

Los hallazgos de esta investigación respaldan el uso de ACP como una herramienta útil para la estratificación de unidades de manejo edafológico, lo que permitirá el diseño de planes de fertilidad diferenciales por municipio o predio, aportando elementos claves en la identificación de limitantes edáficas que contribuyan hacia un manejo sostenible del cultivo de cacao del trópico colombiano. En general el área de estudio presenta condiciones óptimas para el desarrollo del cultivo de cacao, con un potencial de ampliación de áreas de cultivos, aumento de rendimientos e implementación de este cultivo (cacao) como una estrategia de sustitución de cultivos ilícitos, de alta rentabilidad.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

Se cuenta con el aval de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

No aplicable.

CONFLICTO DE INTERESES

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

FINANCIAMIENTO

Este proyecto fue financiado por la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), el OCAD de Ciencia, Tecnología e Innovación del Sistema General de Regalías y el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (Minciencias).

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización y construcción de la metodología: J.L.C.S. y J.M.A.; Metodología: J.L.C.S., J.M.A. y C.K.F.G.; Captura de información en campo: C.K.F.G., J.L.R.V. y J.G.P.; Construcción de bases de datos: C.K.F.G.; Procesamiento y análisis de la información: J.L.C.S., J.M.A., C.K.F.G., J.L.R.V. y J.G.P.; Investigación: J.M.A.; Supervisión del proyecto: J.M.A.; Escritura - preparación del borrador original: J.L.C.S.; Escritura - revisión y edición: J.L.C.S., J.M.A. y C.K.F.G.

AGRADECIMIENTOS












Los autores agradecen a la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), al OCAD de Ciencia, Tecnología e Innovación del Sistema General de Regalías y al Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (Minciencia) por la financiación de la investigación en el marco del proyecto "Implementación de tecnologías de producción para el fortalecimiento de la cadena de valor de cacao y la sostenibilidad ambiental del sistema productivo en el departamento de Córdoba".

LITERATURA CITADA

- Adarme-Duran, C. A., Ágreda, J., Brandão, P. F. B., & Castillo, E. (2024). Cadmium availability in rhizosphere and non-rhizosphere soils in cacao farms in Santander, Colombia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(12), 1254. <https://doi.org/10.1007/s10661-024-13301-x>
- Agudelo-Castañeda, G. A., Antolinez-Sandoval, E. Y., Báez-Daza, E. Y., Jaimes-Suárez, Y. Y., & Romero-Guerrero, G. A. (2023). Nuevas variedades de cacao seleccionadas en Colombia. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 14(3), 315-326. <https://doi.org/10.29312/remexca.v14i3.3057>
- Amponsah-Doku, B., Daymond, A., Robinson, S., Atuah, L., & Sizmur, T. (2022). Improving soil health and closing the yield gap of cocoa production in Ghana-A review. *Scientific African*, 15, e01075. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2021.e01075>
- Arthur, A., Acquaye, S., Cheng, W., Dogbatse, J. A., Konlan, S., Domfeh, O., & Quaye, A. K. (2022). Soil carbon stocks and main nutrients under cocoa plantations of different ages. *Soil Science and Plant Nutrition*, 68(1), 99-103. <https://doi.org/10.1080/00380768.2022.2029219>
- Bai, S. H., Gallart, M., Singh, K., Hannet, G., Komolong, B., Yinil, D., ... & Wallace, H. M. (2022). Leaf litter species affects decomposition rate and nutrient release in a cocoa plantation. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 324, 107705. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107705>
- Bernabé, Y., & Mainault, A. (2015). Physics of Porous Media: Fluid Flow Through Porous Media. In G. Schubert (Ed.). *Treatise on Geophysics* 2.ª ed. (pp. 19-41). Amsterdam, Países Bajos: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53802-4.00188-3>
- Bolou-Bi, E. B., Ettien, J. B. D., & Konan, A. K. (2023). Soil Acidification in Cocoa (*Theobroma cacao*) Agrosystems in Côte d'Ivoire (I): Effect of Carbonate Based Mineral Amendments on Soil Chemical Properties and Growth of Cocoa Seedlings (*Theobroma cacao*). *International Journal of Plant & Soil Science*, 35(22), 398-409. <https://doi.org/10.9734/ijpss/2023/v35i224148>
- 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: United States Department of Agriculture.
- Cadena-Torres, J., Novoa-Yáñez, R. S., Grandett-Martínez, L. M., Contreras-Santos, J. L., & Agamez-Saibis, A. (2021). Caracterización físico-química de los suelos dedicados al cultivo de maíz en el Valle del Sinú, Colombia. *Temas Agrarios*, 26(1), 68-79. <https://doi.org/10.21897/rta.v26i1.2584>
- Calle, J. L., Maldonado, C., & Marza, R. (2023). Diagnóstico de la fertilidad de suelos en dos parcelas para cultivo de cacao (*Theobroma cacao*) y café (*Coffea arabica*) en el municipio de San Buenaventura. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 10(3), 74-82. <https://doi.org/10.53287/fgqo7657sj41i>
- Calle, J. L., Mendoza, M., & Miranda, R. (2021). Aptitud de uso de suelos para el cultivo de Cacao (*Theobroma cacao* L.) en la localidad de Tumupasa, municipio de San Buenaventura-La Paz. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 8(3), 45-58. <https://doi.org/10.53287/burl9765fo12r>
- Carmona-Rojas, L. M., Gutiérrez-Rodríguez, E. A., Henao-Ramírez, A. M., & Urrea-Trujillo, A. I. (2022). Nutrition in cacao (*Theobroma cacao* L.) crops: What determining factors should be considered? *Revista de La Facultad de Agronomía*, 121(Especial 2), 101-101.
- Cely-Torres, L. A. (2017). Oferta productiva del cacao colombiano en el posconflicto. Estrategias para el aprovechamiento de oportunidades comerciales en el marco del acuerdo comercial Colombia-Unión Europea. *Equidad y Desarrollo*, 28, 167-195. <https://doi.org/10.19052/ed.4211>
- Chapman, H. D. (1965). Cation-exchange capacity. En C. A. Black, D. D. Evans, L. E. Ensminger, J. L. White, & F. E. Clark (Eds.). *Methods of soil analysis. Part 2: Chemical and microbiological properties* (pp. 891-901). Madison, WI, USA: American Society of Agronomy; Soil Science Society of America.
- Charry, A., Castro-Llanos, F. A., & Castro-Núñez, A. (2019). *Colombian cacao, forests and peace initiative = Estudio de línea base de la cadena del cacao en Colombia*. Cali, Colombia: International Center for Tropical Agriculture (CIAT).
- 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), e0150860. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0150860>
- Chinnappan, S. (2021). DRIS norms for identifying yield limiting micronutrients in cocoa under coconut intercropping systems. *Journal of Plant Nutrition*, 45(8), 1214-1222. <https://doi.org/10.1080/01904167.2021.1994592>
- Contreras-Santos, J. L., Martínez-Atencia, J., Cadena-Torres, J., Novoa-Yáñez, R. S., & 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 UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 23(2), 1-10. <https://doi.org/10.31910/rudca.v23.n2.2020.1375>
- De Assis Silva, S., dos Santos, R. O., De Queiroz, D. M., de Souza Lima, J. S., Pajehú, L. F., & Medauar, C. C. (2022). Apparent soil electrical conductivity in the delineation of management zones for cocoa cultivation. *Information Processing in Agriculture*, 9(3), 443-455. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2021.04.004>
- De Caires, S. A., Wuddivira, M. N., & Bekele, I. (2015). Spatial analysis for management zone delineation in a humid tropic cocoa plantation. *Precision Agriculture*, 16(2), 129-147. <https://doi.org/10.1007/s11119-014-9366-5>
- Francisco-Santiago, S. P., Palma-López, D. J., Sánchez-Hernández, R., Obrador-Olán, J. J., & García-Alamilla, P. (2023). Fertilidad edáfica y nutrición en el cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) en tres suelos de Tabasco, México. *Terra Latinoamericana*, 41, 1-18. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1116>
- Freeman, G. H., Gomez, K. A., & Gomez, A. A. (1985). Statistical Procedures for Agricultural Research. *Biometrics*, 41(1). <https://doi.org/10.2307/2530673>
- Hendershot, W. H., Lalonde, H., & Duquette, M. (2008). Ion exchange and exchangeable cations. En M. R. Carter & E. G. Gregorich (Eds.). *Soil sampling and methods of analysis* (pp. 196-206). Boca Raton, FL: CRC Press.

- Holdridge, L. R. (1982). *Ecología basada en zonas de vida* (H. Jiménez Saa, Trad.). San José, Costa Rica: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).
- ICA (Instituto Colombiano Agropecuario) (1992). *Fertilización en diversos cultivos: Quinta aproximación* (Manual de asistencia técnica No. 25). Bogotá, Colombia: ICA/Produmedios.
- IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). (2009). *Estudio general de suelos y zonificación de tierras, Departamento de Córdoba* (Escala 1:100 000). Bogotá, Colombia: Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).
- IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). (2006). *Métodos analíticos del laboratorio de suelos* (6.ª ed.). Bogotá, Colombia: IGAC-Subdirección de Agrología.
- Kaiser, H. F. (1960). The application of electronic computers to factor analysis. *Educational and Psychological Measurement*, 20(1), 141-151. <https://doi.org/10.1177/001316446002000116>
- Kongor, J. E., Boeckx, P., Vermeir, P., Van de Walle, D., Baert, G., Afoakwa, E. O., & Dewettinck, K. (2019). Assessment of soil fertility and quality for improved cocoa production in six cocoa growing regions in Ghana. *Agroforestry Systems*, 93(4), 1455-1467. <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0253-3>
- León-Moreno, C. E., Rojas-Molina, J., & Castilla-Campos, C. E. (2019). Physicochemical characteristics of cacao (*Theobroma cacao* L.) soils in Colombia: Are they adequate to improve productivity?. *Agronomía Colombiana*, 37(1), 28-38. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v37n1.70545>
- Martínez-Atencia, J. C., Novoa-Yáñez, R. S., Martínez-Botello, D. H., Espinosa-Carvajal, M. R., Martínez-Reina, A. M., Grandett Martínez, L. M., ... & Rodríguez-Pinto, M. V. (2022). Modelo productivo para el cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) en el departamento de Sucre. Mosquera, Colombia: Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria. <https://doi.org/10.21930/agrosavia.model.7405477>
- Montealegre-Bustos, F., Rojas-Molina, J., & Jaimés-Suárez, Y. (2021). Factores agronómicos y socioeconómicos que inciden en el rendimiento productivo del cultivo de cacao. Un estudio de cacao en Colombia. *Ciencias Agrarias*, 20(2), 59-73.
- Njukeng, N. J., & Baligar, V. C. (2016). Soil physical and chemical properties of cacao farms in the South Western Region of Cameroon. *International Journal of Plant & Soil Science*, 11(6), 1-10. <https://doi.org/10.9734/IJPSS/2016/27037>
- Osei-Gyabaah, A. P., Antwi, M., Addo, S., & Osei, P. (2023). Land suitability analysis for cocoa (*Theobroma cacao*) production in the Sunyani municipality, Bono region, Ghana. *Smart Agricultural Technology*, 5, 100262. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100262>
- Pires, L. F., Borges, J. A., Rosa, J. A., Cooper, M., Heck, R. J., Passoni, S., & Roque, W. L. (2017). Soil structure changes induced by tillage systems. *Soil and Tillage Research*, 165, 66-79. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.07.010>
- Quaye, A. K., Doe, E. K., Attua, E. M., Yiran, G., Arthur, A., Dogbatse, J. A., ... & Addo, D. (2021). Geospatial distribution of soil organic carbon and soil pH within the cocoa agroecological zones of Ghana. *Geoderma*, 386, 114921. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114921>
- Rakshit, A., Singh, H. B., & Sen, A. (2015). Nutrient use efficiency: Nutrient use efficiency: From basics to advances. India: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-81-322-2169-2>
- Rosas-Patiño, G., Puentes-Páramo, Y. J., & Menjivar-Flores, J. C. (2019). Efecto del encalado en el uso eficiente de macronutrientes para cacao (*Theobroma cacao* L.) en la Amazonia colombiana. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 20(1), 5-16.
- R Core Team (2020). R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing.
- 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), 43-52. <https://doi.org/10.22490/21456453.1262>
- Snoeck, D., Koko, L., Joffre, J., Bastide, P., & Jagoret, P. (2016). Cacao nutrition and fertilization. En E. Lichtfouse (Ed.). *Sustainable agriculture reviews* (pp. 155-202). Cham, Switzerland: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-26777-7_4
- UPRA (Unidad de Planificación Rural Agropecuaria) (2021). Comparativo de Área, Producción, Rendimiento y Participación Departamental por Cultivo. Consultado el 23 de marzo, 2024, desde <https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=3>
- Van Vliet, J. A., & Giller, K. E. (2017). Mineral nutrition of cocoa: A review. En D. L. Sparks (Ed.), *Advances in agronomy* (pp. 185-270). San Diego, CA, USA: Elsevier Academic Press. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2016.10.017>
- Vanhove, W., Vanhoudt, N., & Van Damme, P. (2016). Effect of shade tree planting and soil management on rehabilitation success of a 22-year-old degraded cocoa (*Theobroma cacao* L.) plantation. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 219, 14-25. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.12.005>
- Visscher, A. M., Chavez, E., Caicedo, C., Tinoco, L., & Pulleman, M. (2024). Biological soil health indicators are sensitive to shade tree management in a young cacao (*Theobroma cacao* L.) production system. *Geoderma Regional*, 37, e00772. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2024.e00772>
- 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>
- Xue, J. F., Qi, Z. W., Chen, J. L., Cui, W. H., Lin, W., & Gao, Z. Q. (2023). Dynamic of Soil Porosity and Water Content under Tillage during Summer Fallow in the Dryland Wheat Fields of the Loess Plateau in China. *Land*, 12(1), 230. <https://doi.org/10.3390/land12010230>
- Yao, R. J., Yang, J. S., Zhang, T. J., Gao, P., Wang, X. P., Hong, L. Z., & Wang, M. W. (2014). Determination of site-specific management zones using soil physico-chemical properties and crop yields in coastal reclaimed farmland. *Geoderma*, 232, 381-393. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.06.006>
- Zhao, J., Chen, S., Hu, R., & Li, Y. (2017). Aggregate stability and size distribution of red soils under different land uses integrally regulated by soil organic matter, and iron and aluminum oxides. *Soil and Tillage Research*, 167, 73-79. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.11.007>

ANEXO 1. Descripción de paisajes, ambientes morfogenéticos y tipos de suelos.
ANNEX 1. Description of landscapes, morphogenetic environments, and soil types.

Municipio	Asociación o Consociación	Orden taxonómico	Descripción
Montelíbano y Puerto Libertador	Asociación RVJ 	Typic Fluvaquents - Oxyaquic Eutrudepts	Suelos desarrollados a partir de sedimentos mixtos; superficiales a profundos, pobre a moderadamente drenados, con predominio de texturas finas a medias y fertilidad química media a alta
	Asociación RVN 	Typic Eutrudepts - Fluvaquentic Eutrudepts - Dystric Fluventic Eutrudepts	Corresponde al paisaje de planicie aluvial y relieve de terraza baja, pendientes de 1 - 3% (ligeramente plano) a 7 - 12% (moderadamente inclinado), suelos de origen de sedimentos mixtos; texturas moderadamente finas a finas, profundos a superficiales y fertilidad moderada y alta
	Consociación RVO 	Oxyc Dystrudepts	Ubicada en la terraza alta, pertenece al paisaje de planicie aluvial, con relieves ligeramente planos a moderadamente inclinados, y pendientes menores del 12%, suelos bien drenados, profundos con fertilidad moderada.
Montelíbano	Asociación LVA 	Typic Dystrudepts - Oxic Dystrudepts - Fluventic Dystrudepts	Paisaje de lomerío erosional estructural, relieve lomas y colinas, con pendiente ligeramente inclinado a ligeramente empinado (3 - 50%), suelos bien drenados, con texturas moderadamente finas, profundidad superficial y fertilidad muy baja a baja
	Asociación MVD 	Oxic Dystrudepts - Lithic Udorthents - Typic Udorthents	Suelos derivados de rocas mixtas, con erosión en grado ligero, escurrimiento difuso y remoción en masa
Puerto Libertador	Asociación LVE 	Typic Udorthents - Typic Eutrudepts	perteneciente al paisaje de lomerío estructural erosional, de relieve de espinazos y crestones, ligeramente ondulado a moderadamente escarpado y pendientes que varían del 3 al 75%.
Valencia	Consociación PVA 	Typic Dystrudepts	ubicados en relieves relativamente planos a moderadamente inclinados, con pendientes de 1 a 12%. Estos suelos han evolucionado a partir de materiales sedimentarios finos y medios, con buen drenaje a imperfecto, de texturas moderadamente finas a finas, suelos profundos, con fertilidad baja.
	Asociación PVC 	Typic Eutrudepts - Vertic Eutrudepts - Fluva Quentic Eutrudepts	Correspondiente al paisaje piedemonte coluvio - aluvial, en el tipo de relieve de abanico, variando de ligeramente plano a ligeramente inclinado, con pendientes de 1 a 7%. Suelos originados a partir de sedimentos mixtos; con buen drenaje a imperfecto, de texturas finas a moderadas, relativamente profundos y de fertilidad química alta
	Asociación LVB 	Typic Eutrudepts - Lithic Udorthents - Typic Dystrudepts	perteneciente al paisaje de lomerío erosional estructural y relieve de lomas y colinas, ligeramente ondulado a moderadamente escarpado, con pendientes superiores al 75%, suelos desarrollados a partir de arcillolitas, areniscas y conglomerados, con lentes calcáreos, con texturas moderadamente gruesas y finas, con suelos muy superficial a profundos, de fertilidad alta a media
	Asociación LVG 	Typic Udifluvents - Aquic Udifluvents - Fluventic Eutrudepts	perteneciente al paisaje de lomerío fluviogravitacional y al tipo de relieve de vallecitos aluvio - coluviales, con pendientes que varían de 0 a 7%. Son suelos derivados de sedimentos mixtos heterogéneos, de texturas muy finas hasta moderadamente gruesas, suelos con fertilidad media a baja.
Valencia y Tierralta	Asociación PVD 	Aquic Dystrudepts - Typic Udipsamments - Typic Udorthents	En su mayoría se encuentra localizada en el municipio de Tierralta, en el área de paisaje de piedemonte coluvio - aluvial y relieve de abanico y/o glacis, con relieves ligeramente planos y pendientes menores del 3%. Suelos de originados por sedimentos mixtos; bien drenados, de texturas medias a finas, limitados por fluctuaciones del nivel freático, con fertilidad media - alta