

Gradientes Verticales de Propiedades Físicoquímicas del Suelo en Sistemas de Cultivo de Maíz del Litoral Ecuatoriano y sus Implicaciones para el Manejo Agrícola

Vertical Gradients of Soil Physicochemical Properties in Maize Cropping Systems of the Ecuadorian Coastal Region and their Implications for Agronomic Management

Cecilia Tay-Hing-Cajas¹ , Juan Urdánigo-Zambrano^{1,2†} , Norma Guerrero-Chuez¹ ,
Pedro Lozano-Mendoza¹ y Julio Mendoza-Cela³

¹ Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Av. Quito Km 1.5, Santo Domingo de los Tsáchilas. 120501 Quevedo, Los Ríos, Ecuador; (C.TH.C.), (J.U.Z.), (N.G.C.), (P.L.M.).

² Universidad de Córdoba, Facultad de Veterinaria, Departamento de Producción Animal. Campus Universitario de Rabanales, Ctra. Nacional IV-A km 396. 14071 Córdoba, Andalucía, España; (J.U.Z.).

³ Unidad Educativa Génesis. E30 s/n, Sector Centro. 120501 Quevedo, Los Ríos, Ecuador; (J.M.C).

† Autor para correspondencia: jurdanigo@uteq.edu.ec

RESUMEN

Este estudio evaluó los gradientes verticales de propiedades físicas y químicas del suelo en sistemas de cultivo de maíz (*Zea mays*) en los cantones Mocache y Ventanas, Ecuador, con el objetivo de analizar la influencia de la profundidad (0 y 30 cm) y la localización geográfica en la estructura edáfica. Se analizaron 124 muestras mediante modelos lineales generalizados y pruebas no paramétricas. Las fracciones texturales no mostraron diferencias significativas entre profundidades ($p > 0.05$); sin embargo, la densidad aparente aumentó significativamente a 30 cm ($p = 0.01$), al igual que el pH ($p < 0.01$). Se identificaron diferencias inter-cantonales en pH, con valores mayores en Mocache. La interacción Profundidad × Cantón fue significativa para el contenido de arcilla, evidenciando diferenciación textural subsuperficial. El análisis de componentes principales explicó el 54.6 % de la variabilidad total en los dos primeros ejes, estructurados por gradientes asociados a compactación y redistribución química. Estos resultados confirman la heterogeneidad vertical y espacial en suelos agrícolas tropicales y delimitan patrones estructurales que deben considerarse en la planificación de prácticas de manejo orientadas al control de compactación y optimización de la fertilidad en sistemas de producción de maíz.

Palabras clave: compactación edáfica, producción agrícola, perfiles edáficos, suelos tropicales, variabilidad espacial.

SUMMARY

This study evaluated the vertical gradients of soil physical and chemical properties in maize (*Zea mays* L.) cropping systems in the cantons of Mocache and Ventanas, Ecuador, with the aim of analyzing the influence of depth (0 and 30 cm) and geographic location on soil structure. A total of 124 samples were analyzed using generalized linear models and non-parametric tests. Textural fractions did not show significant differences between depths ($p > 0.05$); however, bulk density increased significantly at 30 cm ($p = 0.01$), as did soil pH ($p < 0.01$). Differences between cantons were detected for pH, with higher values observed in Mocache. The Depth × Canton interaction was significant for clay content, indicating subsurface textural differentiation. Principal component analysis explained 54.6% of the total variability in the first two axes, structured by gradients associated with compaction and chemical



Cita recomendada:

Tay-Hing-Cajas, C., Urdánigo-Zambrano, J., Guerrero-Chuez, N., Lozano-Mendoza, O., & Mendoza-Cela, J. (2026). Gradientes Verticales de Propiedades Físicoquímicas del Suelo en Sistemas de Cultivo de Maíz del Litoral Ecuatoriano y sus Implicaciones para el Manejo Agrícola. *Terra Latinoamericana*, 44, 1-13. e2492. <https://doi.org/10.28940/terralatinoamericana.v44i.2492>

Recibido: 15 diciembre de 2025.
Aceptado: 23 de febrero de 2026.
Artículo. Volumen 44.
Mayo de 2026.

Editor de Sección:
Dr. Fernando Abasolo Pacheco



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/>).

redistribution. These findings confirm the presence of vertical and spatial heterogeneity in tropical agricultural soils and identify structural patterns that should be considered when planning management practices aimed at controlling compaction and optimizing soil fertility in maize production systems.

Index words: *edaphic compaction, agricultural production, soil profiles, tropical soils, spatial variability.*

INTRODUCCIÓN

La agricultura intensiva se asocia con una disminución progresiva de la calidad física, química y biológica del suelo (Osuna-Ceja, Martínez, Padilla y Pimentel, 2024). Este deterioro resulta particularmente evidente en sistemas de maíz bajo manejo intensivo, donde la alta frecuencia de cultivo y el uso continuo de insumos aceleran la pérdida de fertilidad. Considerando que los pequeños productores aportan entre el 50 y 75% de los alimentos a escala global, la sostenibilidad de estos sistemas adquiere relevancia estratégica para la seguridad alimentaria (Cuadras-Berrelleza, 2025; FAO, 2004). Propiedades como la textura, la densidad aparente, el pH y la materia orgánica determinan la disponibilidad de nutrientes y condicionan el rendimiento del cultivo (Rodríguez-Delgado, Martín, Pérez y García, 2025). Estas propiedades también presentan variaciones verticales significativas dentro de la capa superficial del suelo (0-30 cm), correspondiente a la zona arable bajo manejo convencional. Este intervalo concentra la mayor actividad radicular y la dinámica de nutrientes en el cultivo de maíz, en función de su arquitectura fibrosa (Lamidi, Murtadha, Afolabi y Olawumi, 2021; Leal-Cevallos, Carbo, Valarezo y Reyna, 2025). No obstante, en suelos tropicales ecuatorianos aún son escasos los estudios sistemáticos que analicen esta estratificación vertical, pese a que la interacción entre clima y manejo intensivo incrementa la heterogeneidad edáfica y condiciona la sostenibilidad agrícola.

La producción de maíz es fundamental para la soberanía alimentaria debido a su utilización tanto en alimentación humana como animal (Zúñiga y Rocel, 2023). Además, constituye uno de los cereales de mayor relevancia económica a nivel mundial (Rodríguez-Delgado *et al.*, 2025). El rendimiento del cultivo depende de factores genéticos, del manejo agronómico y de las condiciones ambientales, así como de la calidad de la semilla y de las características del suelo a lo largo del ciclo productivo (García-Hernández, Araujo, Estrada, Martínez y López, 2025), calidad de semilla, tipo de suelo y manejo desde siembra hasta cosecha (Ayvar-Serna *et al.*, 2020). La evaluación de las propiedades físicas y químicas del suelo permite estimar su fertilidad y comprender su influencia sobre la productividad del cultivo. Estas propiedades presentan alta variabilidad espacial en sistemas agrícolas intensivos, lo que demanda estrategias de manejo técnicamente fundamentadas. Esta necesidad resulta particularmente relevante en contextos tropicales, donde la evidencia científica aún es limitada (Ciarlo *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2025).

Para asegurar la gestión sostenible de los cultivos tropicales es necesario monitorear de forma sistemática los cambios en la fertilidad del suelo mediante la caracterización de sus propiedades fisicoquímicas. Esta evaluación permite fundamentar prácticas de recuperación como labranza profunda, aplicación de enmiendas, incorporación de abonos verdes y manejo de residuos de cosecha, orientadas a fortalecer la fertilidad natural y optimizar la respuesta a nuevas tecnologías (Torres, Yáñez, Martínez, Santos y Saibis, 2021). Estudios demuestran que la ubicación geográfica influye de manera significativa en las propiedades físicas y químicas del suelo, mientras que las variaciones en pendiente modifican la redistribución de partículas y materia orgánica, con efectos directos sobre la fertilidad (Ewunetu, Selassie, Molla, Admase y Gezahegn, 2025). En este contexto, las diferencias geográficas entre cantones generan heterogeneidad edáfica asociada al clima, al uso del suelo y al manejo agrícola. Esta heterogeneidad se expresa en propiedades como pH, densidad aparente y humedad, cuya respuesta varía según la interacción entre profundidad y localización. Por ello, el análisis integrado de estos factores resulta indispensable para formular estrategias de manejo agrícola técnicamente fundamentadas.

Aunque existe información empírica sobre la relación entre las propiedades fisicoquímicas del suelo y los gradientes de profundidad, persiste un vacío de conocimiento respecto a la forma en que las propiedades físicas del suelo se estructuran verticalmente en sistemas agrícolas tropicales. Este vacío es especialmente evidente en Ecuador, donde los estudios científicos sobre estratificación edáfica siguen siendo escasos y la mayor parte de la información disponible proviene de literatura gris con limitaciones metodológicas y sin estándares de control de calidad propios de investigaciones de alto impacto. En este contexto, el estudio tiene como propósito evaluar la variación vertical de propiedades físicas y parámetros químicos básicos del suelo en sistemas de cultivo de maíz del litoral ecuatoriano, mediante la comparación de dos profundidades de muestreo (0 y 30 cm) y el análisis comparativo entre cantones representativos de la región. En este sentido, se plantean como objetivos específicos: (a) evaluar cómo varían las propiedades edáficas entre las capas superficiales y subsuperficiales del perfil agrícola,

(b) describir la distribución de estas propiedades entre los cantones para identificar tendencias espaciales asociadas a la ubicación geográfica dentro del sistema productivo y (c) explorar los patrones de asociación entre las variables físicas y químicas del suelo y sus diferencias según las profundidades y los cantones evaluados. Bajo este enfoque, se propone que las propiedades del suelo presentan patrones definidos de diferenciación vertical y una variación espacial detectable entre los cantones del litoral ecuatoriano.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del Sitio de Estudio y Muestreo

El estudio se desarrolló en la provincia de Los Ríos, Ecuador, en los cantones Mocache y Ventanas, localizados en la región litoral del país. Ambos cantones se caracterizan por una topografía predominantemente plana, con altitudes que oscilan entre 25 y 45 metros de altitud. La provincia de Los Ríos presenta un clima tropical de sabana (Aw) según la clasificación de Köppen, caracterizado por una marcada estacionalidad en el régimen de precipitaciones. La precipitación media anual oscila entre 1200 y 1800 mm, con mayor concentración de lluvias entre enero y abril y un período relativamente seco entre junio y septiembre. La temperatura media anual se sitúa entre 25 y 27 °C, con baja amplitud térmica estacional. Estas condiciones hidrotérmicas favorecen procesos intensivos de lixiviación y dinámica química en el perfil edáfico, lo que resulta particularmente relevante para la interpretación de los gradientes verticales evaluados en el presente estudio.

La localización exacta de los sitios de muestreo se muestra en la Figura 1, donde se presenta el mapa base del área de estudio. Los sistemas agrícolas evaluados corresponden a unidades productivas de pequeña escala (smallholders) ubicadas en los cantones Mocache y Ventanas, desarrolladas sobre depósitos aluviales recientes de la cuenca baja del Guayas. En términos edafológicos, predominan Inceptisoles y Vertisoles según USDA Soil Taxonomy, correlacionados con Cambisols y Vertisols en la WRB, caracterizados por texturas finas y alta capacidad de retención hídrica, con posibles limitaciones de drenaje en sectores de menor elevación. Estos suelos, de origen fluvial, sustentan sistemas de cultivo continuo de *Zea mays* L. con dos ciclos anuales bajo manejo tradicional. El manejo del suelo se basa en labranza convencional mediante maquinaria agrícola para arado, siembra y cosecha. No se dispuso de información sistematizada sobre la aplicación de fertilizantes minerales, enmiendas orgánicas, prácticas de encalado ni esquemas formales de riego en los campos muestreados.

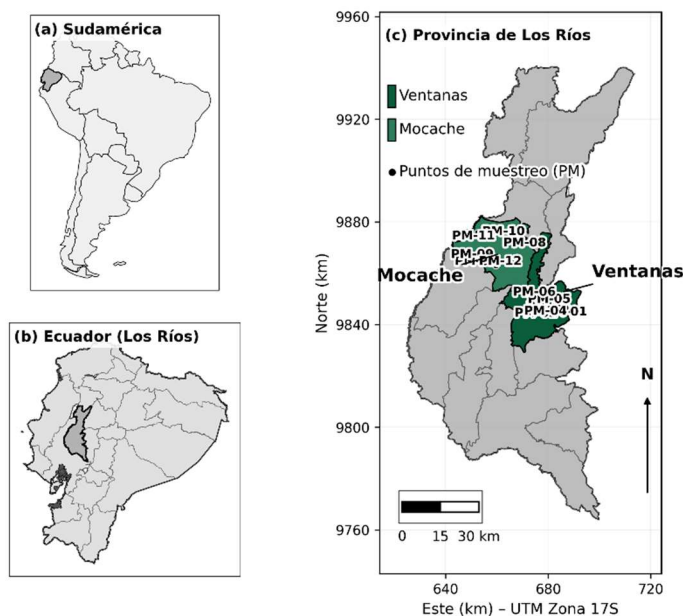


Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio y distribución de los puntos de muestreo en los cantones Mocache y Ventanas, provincia de Los Ríos, Ecuador.

Figure 1. Geographic location of the study area and distribution of soil sampling sites in the Mocache and Ventanas cantons, Los Ríos Province, Ecuador.

El muestreo se realizó entre marzo y octubre de 2025, coincidiendo con etapas de cosecha en los sistemas productivos evaluados. En la región de estudio el cultivo de maíz presenta entre dos y tres ciclos anuales, lo que genera ventanas de cosecha distribuidas a lo largo del año. La selección de esta etapa permitió caracterizar el estado edáfico posterior al ciclo productivo completo, evitando interferencias asociadas a labores inmediatas de establecimiento. Dado que las variables evaluadas corresponden principalmente a propiedades físicas estructurales y parámetros químicos de respuesta relativamente estable en el corto plazo.

Variables Físicoquímicas del Suelo

Para la caracterización físicoquímica de los suelos se empleó un diseño factorial $A \times B$, donde el factor A correspondió al cantón (Mocache y Ventanas) y el factor B a la profundidad de muestreo (0 y 30 cm). Cada sitio representó una unidad experimental independiente (finca), dentro de la cual se evaluaron ambas profundidades, configurando una estructura de medidas repetidas. El estudio incluyó 62 sitios de muestreo, de los cuales se obtuvieron 124 muestras de suelo, dos por sitio. En cada unidad experimental se extrajo una muestra compuesta por profundidad, conformada a partir de submuestras recolectadas siguiendo un patrón en zigzag para capturar la variabilidad espacial (Mendoza y Espinoza, 2017).

Las profundidades seleccionadas corresponden al intervalo que concentra la mayor densidad radicular y actividad biogeoquímica del cultivo de maíz bajo manejo convencional. Previo a la extracción se retiró la hojarasca superficial, y las submuestras se obtuvieron con pala excavadora, asegurando la limpieza del instrumento después de cada punto para evitar contaminación cruzada. Las muestras fueron etiquetadas, almacenadas en bolsas herméticas y transportadas en contenedores térmicos a 4-10 °C hasta su procesamiento en los Laboratorios de Química y Bioquímica, Suelos y Aguas de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo (UTEQ) (Osorio-Vera, Rasche, González, Leguizamón y Fatecha, 2021).

Parámetros Analizados

Los parámetros físicos y químicos evaluados incluyeron: textura del suelo (arena, limo y arcilla), densidad aparente, pH en agua y saturación de humedad. La densidad aparente se determinó mediante el método del terrón, seleccionando tres terrones por muestra. Los terrones fueron secados en estufa a 105 °C durante 48 h, recubiertos con parafina líquida y sometidos a desplazamiento de volumen en una probeta graduada. La densidad aparente se calculó como la relación entre el peso seco del suelo y el volumen desplazado. La textura del suelo se determinó mediante el método hidrométrico de Bouyoucos, empleando lecturas a los 40 s y 2 h, conforme a los procedimientos descritos por Rodríguez-Acosta, Lobo y Torrente (2023). No se realizó pretratamiento químico para la eliminación de materia orgánica ni corrección específica por temperatura, dado que las determinaciones se efectuaron bajo condiciones de laboratorio controladas y homogéneas. A partir de estas lecturas se calcularon los porcentajes de arena, limo y arcilla, permitiendo la clasificación textural de las muestras. El pH del suelo se determinó en una suspensión suelo-agua (1:2.5), utilizando 10 g de suelo seco y tamizado con 25 ml de agua destilada. La suspensión fue agitada durante 5 min, dejada en reposo por 30 min y posteriormente medida con un potenciómetro calibrado (Behnood, Van Tittelboom y De Belie, 2016). Finalmente, la saturación de humedad (S) se calculó como la relación entre el volumen de agua (V_w) y el volumen total de poros (V_v), conforme a la ecuación $S = V_w / V_v$. El volumen de agua se estimó a partir del contenido de humedad gravimétrica y la densidad aparente, mientras que el volumen de poros se derivó de la porosidad total estimada.

Análisis Estadístico

En el análisis estadístico, los datos fueron sometidos a pruebas de normalidad y homogeneidad de varianzas mediante los estadísticos de Shapiro-Wilk y Levene, respectivamente, con el fin de verificar el cumplimiento de los supuestos del análisis paramétrico. Posteriormente, se emplearon modelos lineales generalizados (GLM) bajo un diseño factorial Cantón \times Profundidad para evaluar los efectos principales de cada factor y su interacción sobre las variables edáficas. La significancia estadística de los efectos se determinó mediante pruebas F, considerando un umbral de $p < 0.05$. Cuando se realizaron contrastes bivariados específicos entre cantones, sin considerar la estructura factorial completa, se aplicó la prueba no paramétrica de Mann-Whitney como análisis complementario. Las relaciones lineales entre propiedades físicoquímicas se exploraron mediante correlación de Spearman; para controlar el riesgo de error tipo I asociado a comparaciones múltiples, los valores de significancia fueron ajustados mediante corrección de Bonferroni. Asimismo, se aplicó un análisis de componentes principales (ACP) con el

objetivo de identificar los principales gradientes fisicoquímicos que estructuran la variabilidad del suelo y reducir la dimensionalidad del conjunto de datos. Previamente, las variables fueron estandarizadas mediante centrado y escalado (z-score), con el fin de eliminar el efecto de las diferentes unidades de medida y evitar que el análisis estuviera dominado por variables de mayor varianza. Todos los análisis se realizaron en el entorno estadístico R. empleando los paquetes *readxl*, *dplyr*, *car*, *emmeans*, *FactoMineR* y *factoextra*.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Variación Vertical de las Propiedades Físicas y Químicas del Suelo

Las propiedades edáficas analizadas muestran patrones comparables entre las dos profundidades evaluadas (Cuadro 1). El modelo factorial Cantón × Profundidad no evidenció efecto significativo de la profundidad sobre los contenidos de arena, limo y arcilla ($p > 0.05$), ni interacción significativa entre factores. La saturación de humedad tampoco presentó diferencias asociadas a la profundidad ($p > 0.05$). Los contrastes bivariados entre cantones, evaluados mediante la prueba de Mann-Whitney, tampoco mostraron diferencias significativas en las variables granulométricas ($p > 0.05$). La ausencia de diferencias en composición textural y saturación de humedad entre 0 y 30 cm se asocia a la estabilidad del horizonte superficial bajo cultivo continuo de maíz, posiblemente relacionados con procesos de bioturbación y labranza que favorecen la homogeneización de partículas (Fujisao *et al.*, 2020). En este contexto, la disponibilidad de agua para las plantas se encuentra estrechamente condicionada por el estado físico del suelo, dado que procesos como la compactación modifican la densidad aparente, la distribución de poros y los valores de capacidad de campo y punto de marchitez permanente, con implicaciones directas sobre la aptitud agrícola del suelo (Millan-Romero y Millan, 2020).

La densidad aparente registró valores medios de 1.05 g cm^{-3} en el horizonte superficial y 1.31 g cm^{-3} a 30 cm de profundidad, con diferencias estadísticamente significativas entre niveles ($p = 0.01$). Este incremento en profundidad indica una mayor compactación subsuperficial. En la literatura, valores elevados de densidad aparente se asocian con reducción de macroporosidad, menor aireación y disminución de la conductividad hidráulica, condiciones que pueden afectar el desarrollo radicular del maíz (Felix, 2021). No se evaluaron directamente parámetros mecánicos como resistencia a penetración, macroporosidad o infiltración. Asimismo, la presencia de limitantes físicas en el subsuelo, incluidos horizontes con mayor proporción de fragmentos gruesos, puede contribuir a la reducción de la porosidad efectiva y de la capacidad de retención de agua (Babalola y Lal, 1977). Las prácticas de labranza convencional y las operaciones mecanizadas modifican la estructura edáfica, influyendo sobre la densidad aparente y la porosidad y condicionando procesos como la infiltración y la conductividad hidráulica (Khan, Shah, Nawaz y Khan, 2017). No obstante, en el presente estudio no se cuantificó la intensidad del tráfico ni otros posibles agentes físicos como pisoteo u operaciones puntuales.

Cuadro 1. Estadísticos descriptivos y comparación no paramétrica mediante la prueba de Mann-Whitney U para las propiedades físicas y químicas del suelo evaluadas a 0 y 30 cm de profundidad.

Table 1. Descriptive statistics and non-parametric Mann-Whitney U comparisons for soil physical and chemical properties valuated at 0 and 30 cm Depth.

Variable	Media 0 cm	Media 30 cm	Mediana 0 cm (IQR)	Mediana 30 cm (IQR)	U Mann-Whitney	p-valor
Arena (%)	30.16 ± 7.07	29.44 ± 8.26	31.5 (24.6-34)	31.5 (30-32.9)	2019.5	0.735
Limo (%)	23.99 ± 6.38	24.04 ± 8.19	24 (20-28)	24 (20-28)	1940	0.963
Arcilla (%)	45.85 ± 6.63	46.62 ± 8.82	45 (41-47.4)	43.7 (41.25-50.4)	1993	0.835
Densidad aparente g cm^{-3}	1.05 ± 0.56	1.31 ± 0.46	1.15 (0.46-1.48)	1.38 (1.02-1.64)	1409.5	0.00835
Saturación Humedad %	50.26 ± 24.26	53.92 ± 24.78	53.11 (27.54-69.22)	58.94 (35.88-74.89)	1776	0.397
pH	5.82 ± 0.46	6.71 ± 0.75	5.89 (5.57-6.09)	6.72 (6.16-7.32)	575	1.9E ^{-11*}

Los asteriscos indican significancia estadística al 5%.
Asterisks indicate statistical significance at the 5%.

El pH del suelo presenta diferencias estadísticas significativas entre profundidades ($p < 0.01$), con valores ligeramente ácidos en la capa superficial (5.82) que aumentan hacia condiciones próximas a la neutralidad a 30 cm (6.71). Este gradiente vertical tiene implicaciones directas en la dinámica nutricional, particularmente en la disponibilidad de fósforo, cuya solubilidad disminuye en condiciones ácidas debido a procesos de fijación con óxidos de hierro y aluminio. En suelos con pH bajo, la mayor actividad de aluminio, hierro y manganeso puede generar efectos adversos sobre la producción agrícola (Zeigler, Pandey, Miles, Gourley y Sarkarung, 1995). La toxicidad por aluminio, reportada en concentraciones entre 60 y 300 $\mu\text{g L}^{-1}$ en solución del suelo, puede ocasionar pérdidas de rendimiento de 25-80% en diversos cultivos (Barabasz, Albinska, Jaskowska y Lipiec, 2002), debido principalmente al daño radicular que compromete la absorción de nutrientes (Steiner, Zoz, Pinto, Castagnara y Lopes, 2012). Aunque el valor superficial registrado no corresponde a un rango de acidez extrema, condiciones ácidas moderadas en sistemas tropicales pueden favorecer la actividad de Al intercambiable, afectando la elongación radicular y la eficiencia de absorción. Este gradiente vertical puede explicarse por procesos de redistribución química en el perfil edáfico, controlados por la dinámica de los coloides minerales y orgánicos, los cuales regulan el intercambio catiónico y condicionan la disponibilidad de nutrientes, la actividad biológica y el desarrollo radicular en sistemas agrícolas (Sharma, Datta y Sharma, 2025).

En sistemas agrícolas sometidos a distintos regímenes de labranza, la literatura reporta procesos de estratificación vertical del pH y redistribución de cationes básicos como Ca, Mg y K a lo largo del perfil (Mühlbachová, Růžek, Kusá., Vavera y Káš, 2024). Aunque en el presente estudio no se determinaron cationes intercambiables, aluminio intercambiable ni capacidad de intercambio catiónico, el gradiente vertical de pH observado es consistente con patrones de lixiviación y dinámica de bases documentados en sistemas agrícolas tropicales. Desde una perspectiva agronómica, la acidificación del suelo ha sido reconocida como un factor que condiciona la absorción de nitrógeno y el crecimiento del maíz, mientras que valores de pH cercanos a la neutralidad se asocian con mayor eficiencia en el uso de nutrientes y productividad del cultivo (Pan *et al.*, 2020).

Tendencias Espaciales en las Propiedades Físicas y Químicas del Suelo

Los diagramas de violín mostraron que arena y saturación de humedad presentan medianas similares y solapamiento, mientras que el limo, la densidad aparente y el pH presentaron separaciones más claras entre Mocache y Ventanas (Figura 2). Este comportamiento es congruente con respuestas edáficas diferenciadas frente al manejo agrícola y a las condiciones ambientales locales, tal como ha sido documentado en estudios de síntesis a escala global (Li, Li, Cui y Zhang, 2020). En particular, la arena presentó rangos amplios pero medianas comparables entre sitios ($p = 0.32$), comportamiento similar al observado en la fracción arcilla, que presentó una mayor amplitud en Ventanas sin diferencias estadísticas significativas ($p = 0.11$). De la misma manera, la saturación de humedad mostró un marcado solapamiento entre cantones ($p = 0.82$), mientras que la densidad aparente evidenció una distribución más concentrada en Mocache y más dispersa en Ventanas, aunque sin alcanzar significancia estadística ($p = 0.058$), lo que indica una tendencia cercana al umbral convencional de significancia. En conjunto, estos resultados apuntan a una base textural común, principalmente controlada por el material parental y la evolución geomorfológica del paisaje, más que por efectos asociados al manejo agrícola reciente (Romero-Díaz, Ruíz y Belmonte, 2020).

En contraste, el limo presentó diferencias estadísticamente significativas entre cantones ($p = 0.0025$), con valores más elevados y concentrados en Mocache y una mayor dispersión en Ventanas. Este comportamiento puede interpretarse a la luz de procesos de erosión y deposición selectiva, mediante los cuales las fracciones finas son preferencialmente transportadas y redistribuidas en paisajes agrícolas heterogéneos (Meyer, 2020). De manera complementaria, el pH del suelo también evidenció diferencias significativas entre cantones ($p = 0.0068$), con valores más altos en Mocache frente a un rango más estrecho en Ventanas, patrón que resulta consistente con diferencias en el uso de fertilizantes, enmiendas orgánicas y el historial de manejo del suelo, incluyendo prácticas de encalado (Zhang, Xiang Yang, Wu y Liu, 2022). En este contexto, estudios de largo plazo en sistemas de maíz han demostrado que la variabilidad espacial del pH del suelo está fuertemente condicionada por la fertilización nitrogenada, la aplicación de cal y el manejo de residuos, factores que modulan la acidez, la disponibilidad de cationes básicos y, en consecuencia, la eficiencia de uso del fertilizante y la productividad del cultivo (Daba *et al.*, 2021).

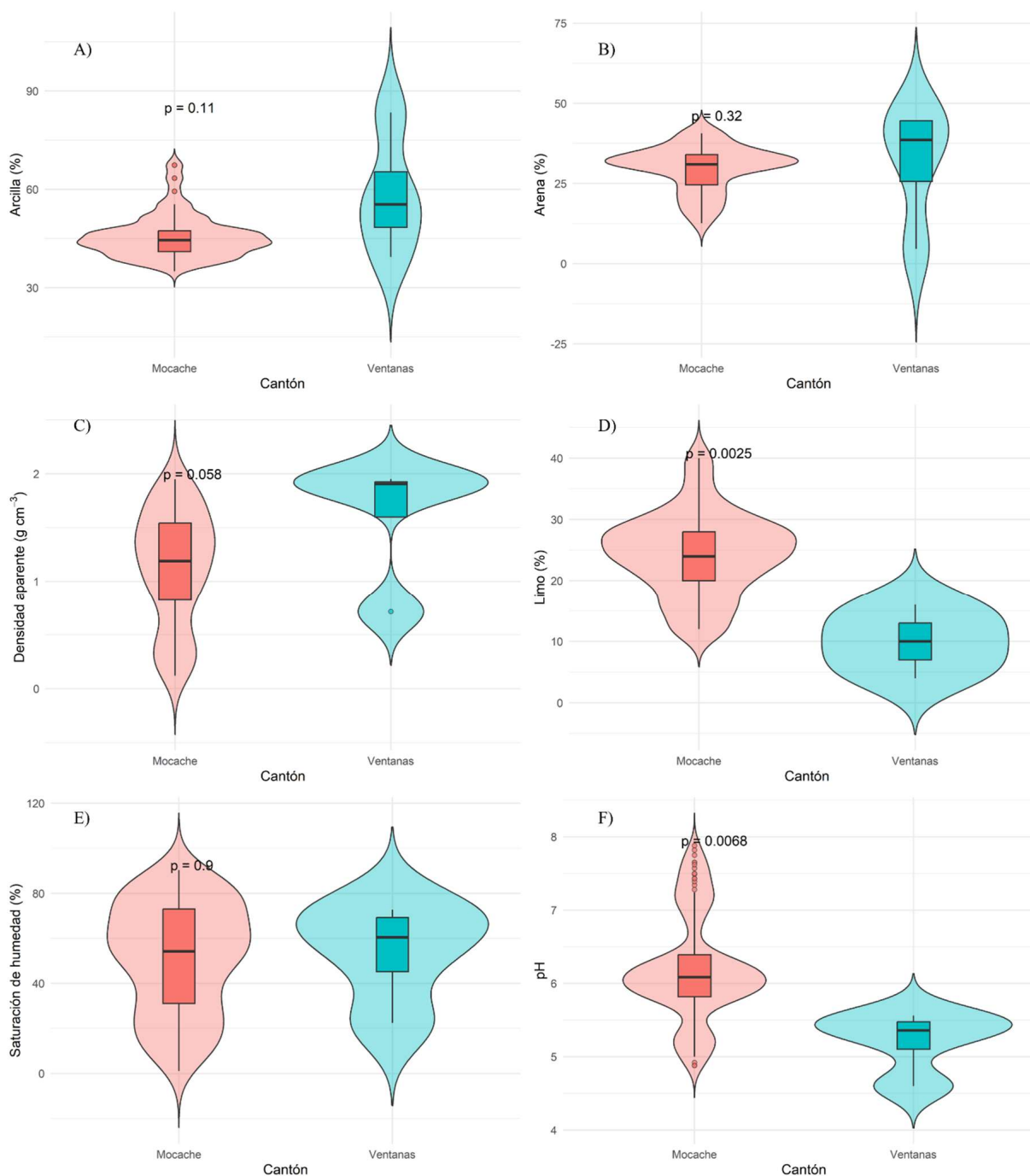


Figura 2. Distribución comparativa de las propiedades edáficas entre los cantones Mocache y Ventanas en sistemas de cultivo de *Zea mays*. (a) Arena (%); (b) limo (%); (c) arcilla (%); (d) densidad aparente(g cm⁻³); (e) saturación de humedad (%); (f) pH del suelo. Cada sección muestra diagramas de violín superpuestos a gráficos de caja que representan la mediana y el rango intercuartílico de cada variable. La dispersión de puntos corresponde a los valores observados por muestra. Los valores de p indicados en cada panel corresponden a la prueba de Mann-Whitney. n = 88 para Mocache y n = 36 para Ventanas. No se aplicó ajuste por comparaciones múltiples en estas pruebas.

Figure 2. Comparative distribution of soil properties between the cantons of Mocache and Ventanas in maize (*Zea mays*) cropping systems. (a) Sand (%); (b) silt (%); (c) clay (%); (d) bulk density (g cm⁻³); (e) moisture saturation (%); and (f) soil pH. Each panel displays violin plots overlaid with boxplots representing the median and interquartile range of each variable. Individual points correspond to observed sample values. The p-values shown in each panel were obtained from the Mann-Whitney test. n = 88 for Mocache and n = 36 for Ventanas. No adjustment for multiple comparisons was applied.

Interacciones Exploratorias Profundidad × Cantón

El análisis mediante modelos lineales generalizados mostró que solo un subconjunto de propiedades edáficas respondió de manera diferenciada a la interacción entre profundidad y cantón, lo que pone de relieve que dichas propiedades no presentan una respuesta uniforme a los gradientes espaciales y verticales en sistemas de *Zea mays*. Desde una perspectiva textural, la ausencia de efectos significativos en las fracciones arena y limo sugiere la existencia de una base granulométrica relativamente estable a escala local. No obstante, la fracción arcillosa presentó diferencias estadísticas en la interacción entre Profundidad × Cantón ($F = 9.88$; $p = 0.0021$). Este comportamiento guarda relación con la influencia dominante de la textura sobre la estabilidad y el comportamiento mecánico del suelo en sistemas de *Zea mays*, en los que los materiales con mayor contenido de partículas finas desarrollan propiedades estructurales diferenciadas entre horizontes (Roskopf, Uteau y Peth, 2022). En consecuencia, el incremento de la fracción arcillosa a 30 cm en Ventanas, frente a valores similares entre 0 y 30 cm en Mocache, lo que puede interpretarse como un indicio de que una mayor concentración de partículas finas en subsuperficie favorece la formación de perfiles más texturizados y funcionalmente diferenciados en paisajes agrícolas (Schapel, Marschner y Churchman, 2018). Estos mecanismos se plantean como interpretaciones sustentadas en la literatura especializada, dado que procesos específicos como migración de arcilla, diferenciación de horizontes o dinámica de deposición no fueron evaluados directamente en el presente estudio.

La densidad aparente presentó un efecto principal de la profundidad ($F = 7.77$; $p = 0.0061$), con incrementos a 30 cm en ambos cantones y sin interacción significativa con la localidad. Este patrón confirma un proceso de compactación subsuperficial común al sistema productivo evaluado, independiente del cantón. La literatura ha documentado que la acumulación de cargas en el subsuelo bajo manejo convencional favorece la formación de capas compactadas que modifican la estructura edáfica y la dinámica hídrica (Zhang *et al.*, 2024). En sistemas de *Zea mays*, este gradiente vertical de compactación se asocia con limitaciones mecánicas y alteraciones en la conductividad hidráulica del perfil (Chen y Weil, 2011). En consecuencia, las implicaciones de manejo deben orientarse hacia prácticas transversales de mitigación de compactación, tales como control de tráfico agrícola, reducción de pases mecanizados y subsolado focalizado.

El pH del suelo presentó una interacción significativa Profundidad × Cantón ($F = 5.28$; $p = 0.023$). Las comparaciones simples mostraron que en Mocache el pH aumentó significativamente entre 0 y 30 cm ($\Delta = 0.98$ unidades; $p < 0.0001$), mientras que en Ventanas no se detectaron diferencias verticales ($p = 0.463$). No se registraron diferencias entre cantones en la capa superficial ($p = 0.618$); a 30 cm Mocache presentó valores significativamente mayores que Ventanas ($\Delta = 1.70$ unidades; $p < 0.0001$). La literatura documenta que gradientes verticales de pH en sistemas agrícolas pueden asociarse con procesos de acidificación superficial inducidos por fertilización nitrogenada y prácticas de encalado, que generan redistribución progresiva de bases en el perfil (Tao *et al.*, 2025). La fracción arcilla también presentó una interacción significativa ($F = 9.88$; $p = 0.0021$). En Mocache no hubo diferencias entre profundidades ($p = 0.717$), mientras que en Ventanas se observó un incremento significativo a 30 cm ($\Delta = 25.33\%$; $p = 0.0022$). Las diferencias entre cantones fueron no significativas en la superficie ($p = 0.357$), pero a 30 cm Ventanas registró contenidos de arcilla significativamente superiores ($\Delta = 19.27\%$; $p < 0.0001$). La saturación de humedad no mostró efectos significativos de profundidad ni interacción, comportamiento consistente con perfiles donde la dinámica hídrica mantiene relativa estabilidad estructural (Fang y Su, 2019).

Asociaciones Lineales entre las Propiedades Edáficas

El correlograma de coeficientes de Spearman y ajustado mediante corrección de Bonferroni mostró asociaciones estadísticamente significativas entre varias propiedades edáficas (Figura 3). Se registraron correlaciones negativas entre arena y limo (p ajustado = 2.15×10^{-7}) y entre arena y arcilla (p ajustado = 1.47×10^{-5}), así como una correlación positiva entre limo y arcilla (p ajustado = 1.92×10^{-7}), lo que confirma el patrón de compensación inherente a las fracciones granulométricas. Además, se identificaron asociaciones significativas entre arcilla y pH (p ajustado = 0.0011), densidad aparente y pH (p ajustado = 0.0095), y densidad aparente y saturación de humedad (p ajustado = 0.0316). En contraste, la saturación de humedad no presentó asociaciones significativas con las fracciones texturales tras el ajuste por comparaciones múltiples. La relación entre mayor contenido de arcilla y valores más elevados de pH puede vincularse con la mayor capacidad de intercambio catiónico de los suelos finos, que favorece la retención de bases (Yunan, Xianliang y Xiaochen, 2018). Por su parte, la asociación entre densidad aparente y saturación de humedad es consistente con sistemas donde el incremento de poros finos y la reducción de macroporos modifican la distribución del agua en el perfil (Usaborisut y Ampanmanee, 2015).

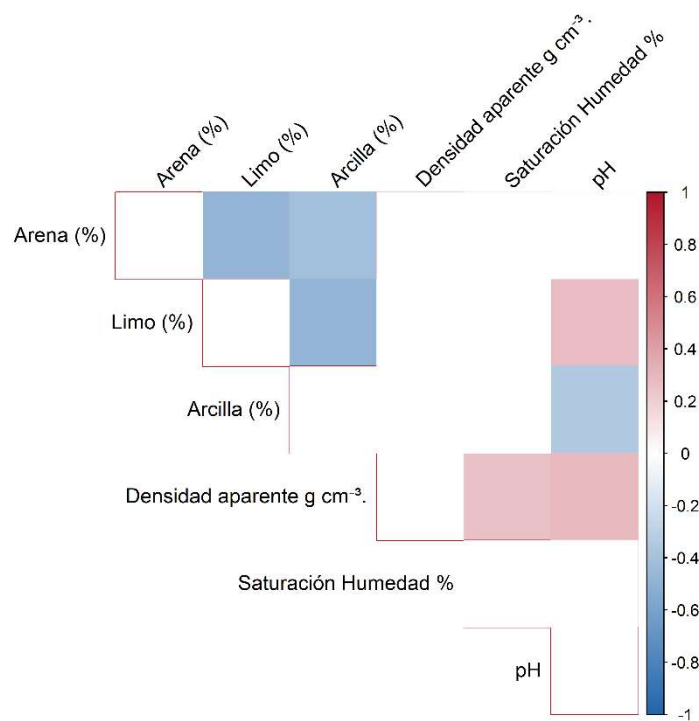


Figura 3. Correlograma de las propiedades físicas y químicas del suelo en sistemas de cultivo de maíz (*Zea mays*).
Figure 3. Correlogram of soil physical and chemical properties in maize (*Zea mays*) cropping systems.

La densidad aparente presentó asociaciones significativas con la saturación de humedad (p ajustado = 0.0316) y con el pH (p ajustado = 0.0095). La relación positiva entre densidad aparente y saturación debe interpretarse considerando que la saturación fue estimada como la proporción entre el volumen de agua retenida y el volumen total de vacíos del suelo. En este contexto, la magnitud de la saturación depende directamente de la estimación de la porosidad total, la cual se relaciona matemáticamente con la densidad aparente. Por tanto, la asociación observada refleja la interacción entre estructura y distribución del espacio poroso más que una medición directa de comportamiento hidrodinámico en condiciones de campo. En sistemas agrícolas con manejo convencional, incrementos en la densidad aparente modifican la configuración del espacio poroso, reduciendo macroporos y alterando la proporción relativa de poros finos, lo que incide en la distribución interna del agua (Bordoloi, Das, Yam, Pandey y Tripathi, 2019; Lardy, DeSutter, Daigh, Meehan y Staricka, 2022). La asociación entre densidad aparente y pH se inscribe en la reorganización fisicoquímica del perfil bajo manejo intensivo, donde los cambios estructurales coexisten con gradientes de acidez y redistribución de bases (Pan *et al.*, 2020).

El pH mostró asociaciones significativas con el contenido de limo (p ajustado = 0.0178) y con la fracción arcilla (p ajustado = 0.0011). Este comportamiento se relaciona con la función amortiguadora de los suelos con mayor proporción de partículas finas, donde la superficie específica y los sitios de intercambio favorecen la retención de bases y la estabilización química del sistema edáfico, así como la modulación de procesos biogeoquímicos en sistemas de maíz con contrastes texturales marcados (Meng, Hu, Feng, Feng y Gao, 2022). Asimismo, la densidad aparente presentó relación significativa con el pH (p ajustado = 0.0095). En este sentido, la compactación modifica la estructura del espacio poroso y reduce la aireación, condiciones que influyen sobre la dinámica de protones y la redistribución de cationes básicos en el perfil edáfico. Además, la literatura indica que la compactación altera propiedades fisicoquímicas de las raíces, incluyendo la reducción de su capacidad de intercambio catiónico y la disminución de grupos funcionales ácidos en la superficie celular (Lipiec y Stępniewski, 1995; Szatanik-Kloc, Horn, Lipiec, Siczek y Szerement, 2018). Estos cambios limitan la absorción de nutrientes y pueden modificar el equilibrio ácido-base en la rizosfera, integrando procesos radiculares y edáficos en un mismo sistema funcional.

Estructura Multivariante de las Propiedades del Suelo (PCA)

El análisis de componentes principales (Figura 4) mostró que las propiedades fisicoquímicas del suelo se estructuran principalmente a lo largo de dos gradientes ambientales que explican el 54.6 % de la variabilidad total. El primer componente (34.5%) define un eje dominado por valores elevados de pH y densidad aparente, en contraste con suelos con mayor contenido de fracciones finas, lo que indica que la compactación y la redistribución química asociada al manejo agrícola estructuran la variabilidad edáfica entre sitios (Teferi, Bewket y Simane, 2016). Asimismo, la configuración de este componente indica que los cambios estructurales inducidos por la compactación influyen directamente sobre la retención de agua del suelo, en concordancia con la estrecha relación entre densidad aparente y la forma de la curva de retención hídrica en suelos compactados (Assouline, 2006). La evidencia acumulada indica que la intensidad y continuidad del uso agrícola condicionan la estructura del suelo y su funcionalidad hídrica, favoreciendo procesos de compactación bajo manejos intensivos y una recuperación gradual de la porosidad y la estabilidad estructural bajo estrategias de manejo más conservacionistas (Acín-Carrera *et al.*, 2013; Zhang, Tan, Wang, Li y Wang, 2021).

El segundo componente (20.1%) describe un gradiente textural que diferencia suelos arenosos en horizontes superficiales de suelos con mayor proporción de limo y arcilla, con una contribución secundaria de la profundidad. Estos resultados evidencian la influencia combinada de profundidad y textura, vinculada al material parental, sobre la organización vertical del perfil edáfico en campos de *Zea mays*, en línea con estudios que muestran cómo la proporción relativa de arena y arcilla regula la distribución vertical de procesos edáficos y radiculares (Wang, Huang, Sun y Yu, 2018). La contribución secundaria de la profundidad refleja un desacoplamiento progresivo de la dinámica hídrica entre capas superficiales y subsuperficiales, fenómeno documentado en sistemas agrícolas y modulado por textura y condiciones ambientales (Li, Skaggs, Ellegaard, Bernal, y Scudiero, 2024). Las diferencias entre Mocache, con suelos más arenosos y de mayor densidad aparente, y Ventanas, con suelos más finos y arcillosos, reflejan escenarios contrastantes de compactación, almacenamiento de agua y disponibilidad de nutrientes, los cuales condicionan la respuesta del cultivo y demandan estrategias de manejo específicas, como se ha documentado en sistemas de maíz donde la textura del suelo influye sobre la densidad aparente, la infiltración y la estabilidad estructural (Kafesu *et al.*, 2018; Shumba *et al.*, 2020). Las interpretaciones asociadas a los gradientes multivariantes se fundamentan en marcos conceptuales previamente documentados en la literatura especializada, dado que variables funcionales como intensidad real de compactación, cationes intercambiables o curvas de retención hídrica no fueron evaluadas directamente en el presente estudio.

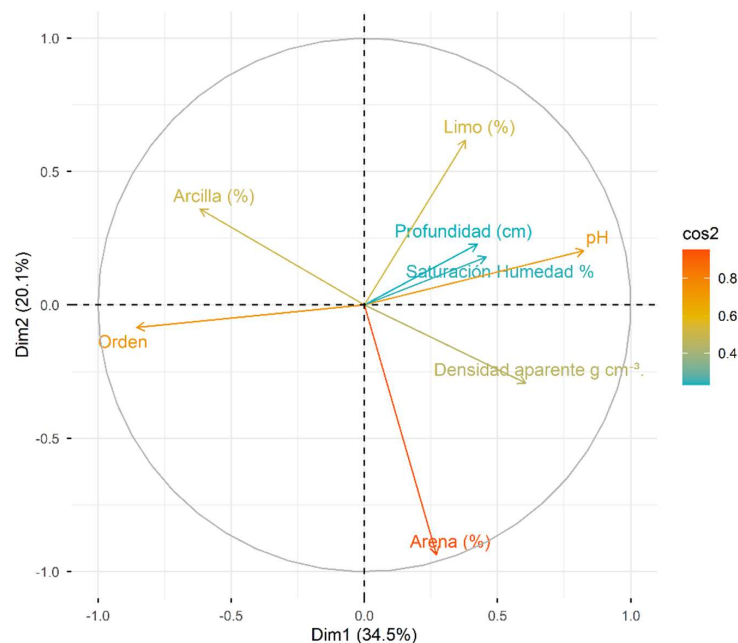


Figura 4. Análisis de Componentes Principales (PCA) de las propiedades fisicoquímicas del suelo en sistemas de cultivo de maíz.

Figure 4. Principal Component Analysis (PCA) of soil physicochemical properties in maize cropping systems.

Implicaciones para el Manejo Agrícola

Los gradientes verticales y espaciales observados en las propiedades fisicoquímicas del suelo poseen implicaciones técnicas para la gestión agronómica de sistemas de maíz en el litoral ecuatoriano. El aumento significativo de la densidad aparente a 30 cm indica compactación subsuperficial con potencial restricción de la elongación radicular y modificación de la conductividad hidráulica del perfil, lo que requiere evaluación estructural específica y control del tráfico mecanizado. Las diferencias verticales del pH, particularmente en Mocache, reflejan procesos de acidificación superficial asociados al manejo, lo que exige diagnósticos estratificados antes de establecer esquemas de encalado o fertilización. La interacción entre textura y profundidad confirma que la distribución de fracciones finas condiciona la dinámica química y la retención de bases en el perfil agrícola. Las diferencias entre cantones delimitan contextos edáficos contrastantes que impiden la extrapolación uniforme de recomendaciones técnicas. En consecuencia, la planificación del manejo debe incorporar explícitamente la estratificación vertical y la heterogeneidad espacial del suelo para optimizar la eficiencia nutricional y preservar la estabilidad estructural en sistemas de cultivo continuo de maíz.

El presente estudio presenta algunas limitaciones que deben considerarse al interpretar los resultados. En primer lugar, no se evaluaron variables directamente asociadas al manejo agrícola, tales como contenidos intercambiables de Ca, Mg o K, capacidad de intercambio catiónico, aluminio intercambiable o indicadores estructurales como estabilidad de agregados, macroporosidad o resistencia a la penetración, lo que restringe la interpretación mecanística de los gradientes físicos y químicos observados. Asimismo, no se dispuso de información sistematizada sobre historial de fertilización, encalado o intensidad de tráfico agrícola por finca, factores que podrían contribuir a la variabilidad edáfica detectada. Finalmente, la estimación de la saturación de humedad se basó en relaciones volumétricas y no en curvas de retención hídrica, por lo que su interpretación hidrológica debe asumirse como indicativa y no como caracterización completa del comportamiento hidráulico del suelo.

CONCLUSIONES

El análisis de las propiedades físicas y químicas del suelo en sistemas de cultivo de maíz mostró diferencias asociadas principalmente a la profundidad y, en menor medida, al cantón. Aunque las fracciones texturales no presentaron variación significativa entre 0 y 30 cm ($p > 0.05$), la densidad aparente aumentó de 1.05 a 1.31 g cm⁻³ ($p = 0.01$; $F = 7.77$) y el pH mostró un incremento significativo en profundidad ($p < 0.01$; $F = 5.28$), confirmando la presencia de gradientes físicos y químicos en el perfil edáfico bajo manejo convencional. La interacción Profundidad × Cantón fue significativa para la fracción arcillosa ($F = 9.88$; $p = 0.0021$) y para el pH, lo que evidencia respuestas diferenciadas según el contexto edafogeográfico. El análisis de componentes principales explicó el 54.6 % de la variabilidad total en los dos primeros ejes, estructurados por gradientes de compactación y redistribución química asociados a textura y profundidad. Los resultados indicaron procesos de compactación subsuperficial y redistribución química susceptibles de intervención mediante ajustes de manejo, tales como control del tráfico agrícola, optimización de la labranza y estrategias de fertilización y encalado.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

No aplicable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

FINANCIACIÓN

La investigación fue financiada por la Universidad Técnica Estatal de Quevedo mediante el proyecto FOCICYT, Novena Convocatoria: "Valoración de la calidad ambiental del suelo en cultivos de maíz (*Zea mays*) en la zona de influencia de la provincia de Los Ríos".

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: J.U.Z. y C.T.H.C.; Metodología: P.L.M.; Software: J.U.Z.; Validación: P.L.M. y N.G.C.; Análisis formal: J.U.Z.; Investigación: N.G.C.; Recursos: C.T.H.C.; Curación de datos: J.M.C.; Escritura - preparación del borrador original: J.U.Z.; Escritura - revisión y edición: J.U.Z.; Visualización: P.L.M.; Supervisión: J.M.C.; Administración del proyecto: J.U.Z.; Adquisición de fondos: C.T.H.C.

AGRADECIMIENTOS

No aplicable.

LITERATURA CITADA

- Acín-Carrera, M., José-Marques, M., Carral, P., Álvarez, A. M., López, C., Martín-López, B., & González, J. A. (2013). Impacts of land-use intensity on soil organic carbon content, soil structure and water-holding capacity. *Soil Use and Management*, 29(4), 547-556. <https://doi.org/10.1111/sum.12064>
- Assouline, S. (2006). Modeling the relationship between soil bulk density and the water retention curve. *Vadose Zone Journal*, 5(2), 554-563. <https://doi.org/10.2136/vzj2005.0083>
- Ayvar-Serna, S., Díaz-Nájera, J. F., Vargas-Hernández, M., Mena-Bahena, A., Tejeda-Reyes, M. A., & Cuevas-Apresa, Z. (2020). Rentabilidad de sistemas de producción de grano y forraje de híbridos de maíz, con fertilización biológica y química en trópico seco. *Terra Latinoamericana*, 38(1), 9-16. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i1.507>
- Babalola, O., & Lal, R. (1977). Subsoil gravel horizon and maize root growth. *Plant and Soil*, 46(2), 337-346. <https://doi.org/10.1007/BF00010090>
- Barabasz, W., Albinska, D., Jaskowska, M., & Lipiec, J. (2002). Ecotoxicology of aluminium. *Polish Journal of Environmental Studies*, 11(3), 199-204.
- Behnood, A., Van Tittelboom, K., & De Belie, N. (2016). Methods for measuring pH in concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 105, 176-188. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.032>
- Bordoloi, R., Das, B., Yam, G., Pandey, P. K., & Tripathi, O. P. (2019). Modeling of Water Holding Capacity Using Readily Available Soil Characteristics. *Agricultural Research*, 8(3), 347-355. <https://doi.org/10.1007/s40003-018-0376-9>
- Chen, G., & Weil, R. R. (2011). Root growth and yield of maize as affected by soil compaction and cover crops. *Soil and Tillage Research*, 117, 17-27.
- Ciarlo, E. A., Muschietti, M. D. P., Peralta, N., Comparín, M., Gregorini, F., Cipriotti, P. A., & Giuffrè, L. (2020). Variabilidad espacial de propiedades del suelo: efecto del uso y tipo. *Ciencia del Suelo*, 38(2), 249-261.
- Cuadras-Berrelleza, A. A. (2025). Cultura de Monitoreo en Calidad de Suelos Agrícolas en el Centro Norte del Estado de Sinaloa. Perspectiva Sustentable e Importancia desde los Laboratorios Locales. *Terra Latinoamericana*, 43, 1-16. <https://doi.org/10.28940/terra.v43i.2043>
- Daba, N. A., Li, D., Huang, J., Han, T., Zhang, L., Ali, S., ... & Wang, B. (2021). Long-term fertilization and lime-induced soil pH changes affect nitrogen use efficiency and grain yields in acidic soil under wheat-maize rotation. *Agronomy*, 11(10), 2069. <https://doi.org/10.3390/agronomy11102069>
- Ewunetu, T., Selassie, Y. G., Molla, E., Admase, H., & Gezahegn, A. (2025). Soil properties under different land uses and slope gradients: Implications for sustainable land management in the Tach Karnary watershed, Northwestern Ethiopia. *Frontiers in Environmental Science*, 13, 1518068. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2025.1518068>
- Fang, J., & Su, Y. (2019). Effects of Soils and Irrigation Volume on Maize Yield, Irrigation Water Productivity, and Nitrogen Uptake. *Scientific Reports*, 9(1), 7740. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-41447-z>
- FAO (Food and Agriculture Organization). (2004). Código de prácticas para la prevención y reducción de la contaminación por aflatoxinas en cacahuate (CXC 55-2004). Roma, Italia: Food and Agriculture Organization.
- Felix, K. A. (2021). Effect of agricultural machinery on physical and hydraulic properties of agricultural soils. *Journal of Soil Science and Environmental Management*, 12(2), 58-66. <https://doi.org/10.5897/JSEM2021.0876>
- Fujisao, K., Khanthavong, P., Oudthachit, S., Matsumoto, N., Homma, K., Asai, H., & Shiraiwa, T. (2020). Impacts of the continuous maize cultivation on soil properties in Sainyabuli province, Laos. *Scientific Reports*, 10(1), 11231. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-67830-9>
- García-Hernández, G., Araujo-Díaz, R., Estrada-Campuzano, G., Martínez-Rueda, C. G., & López-Sandoval, J. A. (2025). Componentes morfológicos y fisiológicos del rendimiento de maíz en respuesta a densidad y fecha de siembra en Toluca. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 16(4), 1-14. <https://doi.org/10.29312/remexca.v16i4.3708>
- Kafesu, N., Chikowo, R., Mazarura, U., Gwenzi, W., Snapp, S., & Zingore, S. (2018). Comparative fertilization effects on maize productivity under conservation and conventional tillage on sandy soils in a smallholder cropping system in Zimbabwe. *Field Crops Research*, 218, 106-114. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.01.014>
- Khan, S., Shah, A., Nawaz, M., & Khan, M. (2017). Impact of different tillage practices on soil physical properties, nitrate leaching and yield attributes of maize (*Zea mays* L.). *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 17(1), 240-252. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162017005000019>
- Lamidi, W. A., Murtadha, M. A., Afolabi, M. S., & Olawumi, A. E. (2021). Effect of depths of tillage on the performances of open-pollinated yellow Maize (*Zea Mays*) varieties. *Polish Journal of Natural Science*, 36(3), 215-228.
- Lardy, J. M., DeSutter, T. M., Daigh, A. L. M., Meehan, M. A., & Staricka, J. A. (2022). Effects of soil bulk density and water content on penetration resistance. *Agricultural & Environmental Letters*, 7(2), e20096. <https://doi.org/10.1002/ael2.20096>

- Leal-Cevallos, C. O., Carbo-Ibarra, J. V., Valarezo-Beltrón, C. O., & Reyna-Bowen, J. L. (2025). Características de los suelos con manejo de cultivos de rotación y bosque protector. *Revista de Ciencias Agropecuarias*, 8(16), 35-47.
- Li, N., Skaggs, T. H., Ellegaard, P., Bernal, A., & Scudiero, E. (2024). Relationships among soil moisture at various depths under diverse climate, land cover and soil texture. *Science of The Total Environment*, 947, 174583. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174583>
- Li, Y., Li, Z., Cui, S., & Zhang, Q. (2020). Trade-off between soil pH, bulk density and other soil physical properties under global no-tillage agriculture. *Geoderma*, 361, 114099. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114099>
- Lipiec, J., & Stepniewski, W. (1995). Effects of soil compaction and tillage systems on uptake and losses of nutrients. *Soil and Tillage Research*, 35(1), 37-52. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(95\)00474-7](https://doi.org/10.1016/0167-1987(95)00474-7)
- Mendoza, R. B., & Espinoza, A. (2017). Guía técnica para muestreo de suelos. Managua, Nicaragua: Universidad Nacional Agraria.
- Meng, F., Hu, K., Feng, P., Feng, G., & Gao, Q. (2022). Simulating the effects of different textural soils and N management on maize yield, N fates, and water and N use efficiencies in northeast China. *Plants*, 11(23), 3338. <https://doi.org/10.3390/plants11233338>
- Meyer, L. D. (2020). Erosion processes and sediment properties for agricultural cropland. In *Hillslope processes* (pp. 55-76). Boca Raton, FL, USA: Routledge.
- Millan-Romero, E., & Millan-Paramo, C. (2020). Relationship of water parameters with the optimum moisture content in clay soils. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 15(15), 1666-1671.
- Mühlbachová, G., Růžek, P., Kusá, H., Vavera, R., & Káš, M. (2024). Nutrient Distribution in the Soil Profile Under Different Tillage Practices During a Long-Term Field Trial. *Agronomy*, 14(12), 3017. <https://doi.org/10.3390/agronomy14123017>
- Osorio-Vera, L. R., Rasche-Alvarez, J. W., González-Blanco, A. N., Leguizamón-Rojas, C. A., & Fatecha-Fois, D. A. (2021). Fertilización con zinc en trigo, maíz y sésamo en suelos de diferentes texturas. *Investigación Agraria*, 23(2), 53-62. <https://doi.org/10.18004/investig.agrar.2021.diciembre.2302691>
- Osuna-Ceja, E. S., Martínez-Gamiño, M. Á., Padilla-Ramírez, J. S., & Pimentel-López, J. (2024). Indicadores de calidad de suelo y productividad sustentable con agricultura de conservación. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 15(8), e2970. <https://doi.org/10.29312/remexca.v15i8.2970>
- Pan, X., Baquy, M. A. A., Guan, P., Yan, J., Wang, R., Xu, R., & Xie, L. (2020). Effect of soil acidification on the growth and nitrogen use efficiency of maize in Ultisols. *Journal of Soils and Sediments*, 20(3), 1435-1445. <https://doi.org/10.1007/s11368-019-02515-z>
- Rodríguez-Acosta, D., Lobo-Luján, D., & Torrente-Trujillo, A. (2023). Granulometría del suelo en zonas de pendiente. Comparación de métodos de determinación. *Acta Agronómica*, 72(1), 38-46. <https://doi.org/10.15446/acag.v72n1.107333>
- Rodríguez-Delgado, I., Martín-Martín, G. J., Pérez-Iglesias, H. I., & García-Batista, R. M. (2025). Comportamiento de propiedades físicas, químicas y biológica del suelo en sistemas de producción agrícola. *Revista Metropolitana de Ciencias Aplicadas*, 8(S1), 184-196.
- Romero-Díaz, A., Ruíz-Sinoga, J. D., & Belmonte-Serrato, F. (2020). Physical-chemical and mineralogical properties of parent materials and their relationship with the morphology of badlands. *Geomorphology*, 354, 107047. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107047>
- Roskopf, U., Uteau, D., & Peth, S. (2022). Development of mechanical soil stability in an initial homogeneous loam and sand planted with two maize (*Zea mays* L.) genotypes with contrasting root hair attributes under in-situ field conditions. *Plant and Soil*, 478(1-2), 143-162. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05572-5>
- Schapel, A., Marschner, P., & Churchman, J. (2018). Clay amount and distribution influence organic carbon content in sand with subsoil clay addition. *Soil and Tillage Research*, 184, 253-260. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.08.001>
- Sharma, U. C., Datta, M., & Sharma, V. (2025). Chemistry, microbiology, and behaviour of acid soils. In U. C. Sharma, M. Datta, & V. Sharma (Eds.). *Soil acidity: Management options for higher crop productivity* (pp. 121-322). Cham, Switzerland: Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-3-031-76357-1_3
- Shumba, A., Dunjana, N., Nyamasoka, B., Nyamugafata, P., Madyiwa, S., & Nyamangara, J. (2020). Maize (*Zea mays*) yield and its relationship to soil properties under integrated fertility, mulch and tillage management in urban agriculture. *South African Journal of Plant and Soil*, 37(2), 120-129. <https://doi.org/10.1080/02571862.2019.1678686>
- Steiner, F., Zoz, T., Pinto-Junior, A. S., Castagnara, D. D., & Lopes-Dranski, J. A. (2012). Effects of aluminum on plant growth and nutrient uptake in young physic nut plants. *Semina: Ciências Agrárias*, 33(5), 1779-1788. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2012v33n5p1779>
- Szatanik-Kloc, A., Horn, R., Lipiec, J., Siczek, A., & Szerement, J. (2018). Soil compaction-induced changes of physicochemical properties of cereal roots. *Soil and Tillage Research*, 175, 226-233. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.08.016>
- Tao, J., Fan, L., Jiang, T., Song, X., Zhao, M., Zhou, J., ... & Zamanian, K. (2025). *In situ* visualization of soil profile acidification and processes following nitrogen fertilization and liming. *Geoderma*, 456, 117243. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2025.117243>
- Teferi, E., Bewket, W., & Simane, B. (2016). Effects of land use and land cover on selected soil quality indicators in the headwater area of the Blue Nile basin of Ethiopia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(2), 83. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-5086-1>
- Torres, J. C., Yáñez, R. S. N., Martínez, L. M. G., Santos, J. L. C., & Saibis, A. 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.
- Usaborisut, P., & Ampanmanee, J. (2015). Compaction properties of silty soils in relation to soil texture, moisture content and organic matter. *American Journal of Agricultural and Biological Sciences*, 10(4), 178-185. <https://doi.org/10.3844/ajabssp.2015.178.185>
- Wang, L. Q., Ma, D. L., Liu, H. Y., Hu, S. P., Yu, X. F., & Gao, J. L. (2025). Soil fertility differences due to tillage methods modulate maize yield formation at different planting densities. *Scientific Reports*, 15(1), 2437. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-85924-0>
- Wang, S., Huang, Y., Sun, W., & Yu, L. (2018). Mapping the vertical distribution of maize roots in China in relation to climate and soil texture. *Journal of Plant Ecology*, 11(6), 899-908. <https://doi.org/10.1093/jpe/rty015>
- Yunan, D., Xianliang, Q., & Xiaochen, W. (2018, July). Study on cation exchange capacity of agricultural soils. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 392(4), 042039. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/392/4/042039>
- Zeigler, R. S., Pandey, S., Miles, J., Gourley, L. M., & Sarkarung, S. (1995). Advances in the selection and breeding of acid-tolerant plants: Rice, maize, sorghum and tropical forages. In R. A. Date, N. J. Grundon, G. E. Rayment, & M. E. Probert (Eds.). *Plant-soil interactions at low pH: Principles and management* (pp. 391-406). Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers. https://doi.org/10.1007/978-94-011-0221-6_59
- Zhang, B., Jia, Y., Fan, H., Guo, C., Fu, J., Li, S., ... & Ma, R. (2024). Soil compaction due to agricultural machinery impact: A systematic review. *Land Degradation & Development*, 35(10), 3256-3273. <https://doi.org/10.1002/ldr.5144>
- Zhang, X., Xiang, D. Q., Yang, C., Wu, W., & Liu, H. B. (2022). The spatial variability of temporal changes in soil pH affected by topography and fertilization. *Catena*, 218, 106586. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106586>
- Zhang, Y., Tan, C., Wang, R., Li, J., & Wang, X. (2021). Conservation tillage rotation enhanced soil structure and soil nutrients in long-term dryland agriculture. *European Journal of Agronomy*, 131, 126379. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126379>
- Zúñiga, W. W. B., & Rocel, D. O. P. (2023). Evaluación del rendimiento en la producción de maíz mediante la aplicación de tres bioestimulantes en el cantón joya de los sachas. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(2), 8928-8950.