

PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DEL SUELO EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE PALMA ACEITERA (*Elaeis guineensis* Jacq.) EN CURIMANÁ, PERÚ

Physicochemical properties of soil in oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) production systems in curimaná, Perú

Luis Tibhy Acosta Trinidad¹, Jafeth Benyamin Cespedes Ratto², Freddy Ronny Cespedes Ratto³

RESUMEN

El cultivo de palma aceitera en Curimaná constituye una actividad económica de importancia; sin embargo, su desarrollo y expansión se realizan sobre suelos susceptibles a la degradación. Además, no se dispone de información suficiente sobre las propiedades fisicoquímicas de estos suelos, lo que representa una limitante para un manejo agronómico sustentable. Ante ello, el objetivo de esta investigación fue caracterizar las propiedades fisicoquímicas del suelo en los sistemas de producción de palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq.) en el distrito de Curimaná (Padre Abad, Ucayali, Perú), con la finalidad de generar conocimiento sobre grupos de sistemas con aptitud productiva y estado conservacionista del recurso suelo. La investigación fue de tipo básica, de diseño no experimental y de enfoque cuantitativo, evaluándose diez sistemas de producción con plantaciones híbridas. En cada sistema se tomaron muestras compuestas de suelo, las cuales fueron analizadas en laboratorio para determinar propiedades físicas y químicas; los datos se procesaron mediante estadística descriptiva. Los resultados evidenciaron que la mayoría de los sistemas presentaron un pH neutro a moderadamente alcalino, alta saturación de bases, elevada disponibilidad de Ca y Mg y contenidos altos de materia orgánica, aunque con bajos niveles de nitrógeno total y disponibilidad limitada de fósforo en una proporción importante de suelos. El análisis de agrupamiento permitió identificar tres grupos de sistemas con diferenciada aptitud productiva: un grupo con suelos fuertemente ácidos y baja fertilidad, un grupo con suelos alcalinos y fertilidad intermedia, y un grupo con condiciones edáficas más favorables, mayor fertilidad y mejor retención hídrica. Se concluye que existe una marcada diferenciación edáfica entre sistemas, lo que condiciona su potencial productivo.

Palabras clave: capacidad de campo, cultivo tropical, fertilidad del suelo, materia orgánica, textura del suelo

ABSTRACT

Oil palm cultivation in Curimaná constitutes an economically important activity; however, its development and expansion take place on soils susceptible to degradation. In addition, there is insufficient information on the physicochemical properties of these soils, which represents a limitation for sustainable agronomic management. Therefore, the objective of this study was to characterize the physicochemical properties of soils in oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) production systems in the district of Curimaná (Padre Abad, Ucayali, Perú), in order to generate knowledge about groups of systems with productive suitability and the conservation status of the soil resource. This research was basic in nature, with a non-experimental design and a quantitative approach, evaluating ten production systems with hybrid plantations. In each system, composite soil samples were collected and analyzed in the laboratory to determine physical and chemical properties; the data were processed using descriptive statistics. The results showed that most systems had neutral to moderately alkaline pH, high base saturation, high availability of Ca and Mg, and high organic matter contents, although with low total nitrogen levels and limited phosphorus availability in a significant proportion of soils. Cluster analysis made it possible to identify three groups of systems with different productive suitability: one group with strongly acidic soils and low fertility, a group with alkaline soils and intermediate fertility, and a group with more favorable edaphic conditions, higher fertility, and better water retention. It is concluded that there is marked edaphic differentiation among systems, which conditions their productive potential.

Keywords: field capacity, tropical crop, soil fertility, organic matter, soil texture

¹ Escuela de Formación Profesional de Agronomía, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión. Oxapampa, Pasco, Perú. <https://orcid.org/0000-0002-1276-1777>. lacosta@undac.edu.pe

² Escuela de Formación Profesional de Agronomía, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión. Oxapampa, Pasco, Perú. <https://orcid.org/0009-0005-7372-4370>. 2115403080@undac.edu.pe

³ F Consultores S.R.L. Ucayali, Perú. <https://orcid.org/0009-0008-4472-0655>. fconsultores.srl@gmail.com

INTRODUCCIÓN

Los suelos en la amazonia del Perú están bajo condiciones climáticas cálidas y húmedas con precipitaciones que superan el rango de 2500 a 3000 mm anuales, considerándose un clima tropical húmedo (Chuchon-Remon et al., 2026). En estas condiciones la intensa meteorización química favorece la lixiviación de bases y la formación de suelos fuertemente ácidos con predominancia de óxidos de hierro y aluminio, lo que limita su fertilidad natural (Kamarudheen et al., 2025; Lal, 2004; Villacis et al., 2021). Los suelos amazónicos comprenden principalmente Oxisoles y Ultisoles conformados bajo vegetación de bosque húmedo tropical, con disponibilidad baja de nutrientes y una capacidad de intercambio catiónico reducida (de Oliveira et al., 2022). La alta saturación de aluminio y la baja disponibilidad de fósforo son características recurrentes que restringen la productividad agrícola sin fertilización adecuada (Omenda et al., 2021; Sanchez, 1976; Lal, 2004). La heterogeneidad de la zona amazónica se asocia con las variaciones sustanciales en las propiedades fisicoquímicas de sus suelos, que están controladas potencialmente por las dinámicas hidrológicas (Quesada et al., 2011). Esta condición es clave para entender como los suelos responden al cambio de uso hacia sistemas de agrícolas como la palma aceitera.

Las propiedades físicas del suelo, como textura, estructura, densidad aparente, porosidad y capacidad de infiltración, son determinantes para el desarrollo de las raíces, la disponibilidad de agua e intercambio de gases en los sistemas de cultivo (Daly et al., 2023; Hillel, 2003). La adecuada relación entre los sólidos, aire y agua en el suelo hace posible que las plantas usen los nutrientes más eficientemente (Xing et al., 2025; Zavaleta, 1992). En los suelos de la amazonia, es frecuente encontrar texturas francas y franco arcillosas con alta variabilidad espacial, asociados a procesos de deposición aluvial y al tránsito fluvial histórico de sedimentos (Minasny y Hartemink, 2011; Sanchez, 2019). La presencia de arcillas de tipo 1:1 y de alta actividad favorece la retención de agua, pero también incrementa la susceptibilidad a la compactación si se

modifica la cobertura vegetal inicial (van der Sande et al., 2022; Syers y Rimmer, 1994). La conversión de los bosques presentes en este tipo de zona a cultivos permanentes suele aumentar la densidad aparente y reducir la porosidad macro, lo que afecta negativamente la infiltración del agua y puede elevar el riesgo de escorrentía superficial (Guillaume et al., 2015; Kurniawan et al., 2018).

En estos suelos la fertilidad natural es baja debido a la intensa lixiviación de bases y la escasa retención de nutrientes, lo que se traduce en bajos niveles de calcio, magnesio, potasio y fósforo disponibles para las plantas (Regasa et al., 2025; Lal, 2004). El potencial de hidrogeniones (pH) suele encontrarse en rangos ácidos (pH menores a 5.5), lo que incrementa la toxicidad por aluminio intercambiable y reduce la disponibilidad de fósforo debido a la fijación con óxidos de hierro y aluminio (Bohn et al., 2001; Roy et al., 2006; Rivera et al., 2016; Chico et al., 2016). Este contexto, condiciona la respuesta productiva de los cultivos y requerirá para muchos sistemas agrícolas estrategias agronómicas que mejoren la disponibilidad de nutrientes esenciales (Roy et al., 2006; Nelson, 2023). En plantaciones de palma aceitera, la disponibilidad de nutrientes en el suelo se ven afectadas en comparación con sistemas de vegetación natural o manejos no intensivos (Pérez y Pérez, 2023).

La productividad de este cultivo depende de condiciones climáticas estables con altas precipitaciones, temperaturas medias anuales entre 24 y 28 °C y suelos bien drenados con profundidad adecuada y textura franca a franca arcillosa (Corley y Tinker, 2015). Además, requiere una cantidad sustancial de macronutrientes y micronutrientes para lograr un crecimiento y rendimiento óptimo (Ayompe et al., 2025). En estos sistemas agrícolas, la densidad de siembra es variada (167 11.2 palmas por hectárea) con manejo nutricional basado en análisis de suelo y foliar (Ayala et al., 2004; Sterling et al., 2007). El manejo del suelo y nutrientes para sostener la producción de frutos, es crítico para la sustentabilidad del sistema y conservación del

componente suelo (Yepes, 2019; Furcal-Beriguete et al., 2023; Salgado-García et al., 2023).

En la amazonia del Perú, la palma aceitera es uno de los cultivos permanentes más importantes y que ejerce potencialmente una presión sobre los ecosistemas de la amazonia (Yupanqui et al., 2021). Del mismo modo Pérez y Pérez (2023) y Pérez-Sato et al. (2023) reportan que existe un debate sobre el manejo de estos sistemas y la modificación de propiedades fisicoquímicas del suelo. Asimismo, Pérez-Sato et al. (2023) y Hergoualc'h et al. (2025) reportaron que las propiedades fisicoquímicas del suelo varían significativamente con la edad de la palma aceitera al comparar con pasturas, en términos de densidad aparente y disponibilidad de nutrientes. En particular para los sistemas de Curimaná no se cuenta con información sistemática que caracterice estas propiedades y permita evaluar el estado actual del recurso suelo; en consecuencia, hay una dificultad en establecer una línea base sobre estas propiedades y proponer estrategias agronómicas de manejo para garantizar la sustentabilidad del cultivo en el distrito. Ante estas consideraciones, la investigación tuvo como objetivo caracterizar las propiedades fisicoquímicas del suelo en los sistemas de producción de palma

aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq.) en el distrito de Curimaná, provincia de Padre Abad, departamento de Ucayali, Perú, con la finalidad de generar conocimiento sobre grupos de sistemas con aptitud productiva y estado conservacionista del recurso suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del estudio y tipo de investigación

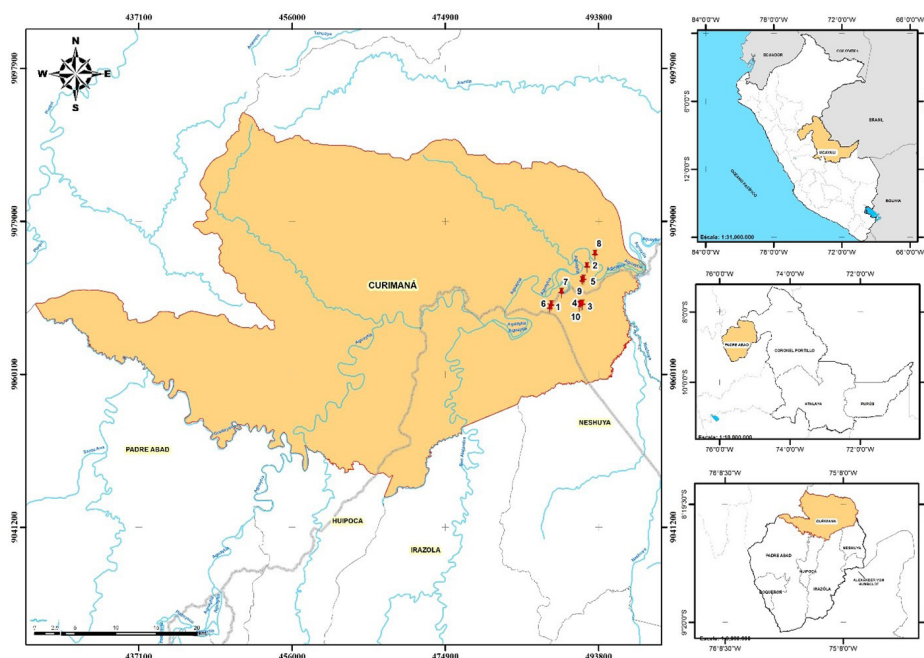
Las unidades agrícolas de estudio se encontraron en el distrito de Curimaná, que forma parte de la provincia de Padre Abad (Figura 1), en el departamento de Ucayali (Perú), ubicado a una altitud promedio de 168 metros sobre el nivel del mar (msnm) con temperaturas que varían de 21.9 a 32.91 °C y 1 532.1 mm de precipitación pluvial acumulada de enero a setiembre (SENAMHI, 2025), el mismo que corresponde a un paisaje amazónico de llanura. La investigación fue de tipo básica, de diseño no experimental (descriptivo de corte transversal prospectivo) y de enfoque cuantitativo.

Plantaciones de palma aceitera

Se estudiaron diez sistemas de producción de palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq.) que utilizan materiales híbridos intra e interespecíficos derivados de *Elaeis guineensis* y *Elaeis olerifera*, con un periodo

Figura 1.

Localización de los sistemas de producción de palma aceitera



vegetativo promedio de 12.8 años [error estándar de la media (EEM) = 0.9]; la densidad media fue de 127.8 plantas por hectárea (EEM = 3.47), el área promedio de las unidades agrícolas fue de 9.6 ha (EEM= 1.75) y la altitud promedio correspondió a 162.98 msnm (EEM= 3.34) entre ubicación de sistemas (Tabla 1). Todos los sistemas evaluados presentaron un arreglo botánico de monocultivo con inclusión de kudzu (*Pueraria* sp.) como abono verde, bajo un esquema de producción convencional; se caracterizan por el uso de fertilizantes sintéticos mezclados (urea, fosfato diamónico y cloruro de potasio en proporciones de 30 %, 10 % y 60 %, respectivamente); estos se aplican

dos veces al año, a una dosis de 100 g por planta, distribuidos en un radio de 1.2 m alrededor del tallo; el control de crecimiento de kudzu se realiza una vez al año mediante manejo mecánico con desbrozadora; por su parte, la cosecha se efectúa aproximadamente doce veces al año, empleando maquinaria agrícola, principalmente motocargueros dentro de la plantación.

Colecta de muestras de suelo

En cada sistema se recolectó una muestra compuesta conformada por 15 submuestras, obtenidas a una profundidad de 0.2 m en el espacio entre las hileras de palma aceitera. A partir de esta muestra, se preparó

Tabla 1.

Características de los sistemas de producción de palma aceitera estudiados en Curimaná (Ucayali, Perú)

Sistema	Material vegetal híbrido de palma aceitera	Periodo vegetativo (años)	Densidad de siembra (plantas/ha)	Área sembrada (ha)	Altitud (msnm)
1	Challenger*	12	123	10	152.35
2	Challenger	13	123	5	158.37
3	Challenger	15	123	5	176.07
4	DLM Advance**	17	123	5	172.19
5	DLM Advance	12	123	15	164.03
6	Challenger	8	123	3	152.59
7	Challenger	10	123	10	152.61
8	DLM Advance	12	156	8	153.27
9	DLM Advance	17	123	20	168.96
10	DLM Advance	12	138	15	179.39
	Media	12.8	127.8	9.6	162.98
	E.E.M.	0.9	3.47	1.75	3.34

Nota. * E. oleifera x E. guineensis con E. guineensis. ** Deli x La Mé; E. guineensis x E. guineensis

una submuestra representativa de aproximadamente 1 kg de suelo, la cual fue destinada al análisis fisicoquímico en el laboratorio SGS (Société Générale de Surveillance). El muestreo se realizó durante el periodo de estiaje (25 de septiembre de 2025).

Análisis de suelos

En el laboratorio se realizó el análisis de materia orgánica (MO), determinada por volumetría mediante el método de Walkley y Black; la textura del suelo, mediante el método del hidrómetro; potencial de hidrogeniones (pH) y conductividad eléctrica, ambos determinados por potenciometría. Asimismo, se evaluó

la capacidad de intercambio catiónico, el nitrógeno (N) total, elementos cambiables (Ca, K, Mg, Na, Al y H), determinados por saturación de acetato de amonio, y el B soluble mediante espectrofotometría UV-Visible. También, se analizaron los elementos disponibles (P, K, Ca, Mg y Na) mediante acetato de amonio, y Mn, Cu, Zn y Fe mediante el método de Olsen modificado. Además, se calcularon la acidez intercambiable (Sparks, 2003; Porta et al., 2013), saturación de bases (Weil y Brady, 2017; Porta et al., 2013), capacidad de campo (CC, expresada como porcentaje de humedad gravimétrica según (Peele y Beale, 1950), punto de marchitez permanente (PMP, porcentaje de humedad

gravimétrica y agua disponible (AD, porcentaje de humedad gravimétrica; Passioura, 2006).

Análisis estadístico

Para la caracterización de los sistemas en términos de la condición fisicoquímica del suelo, se aplicó estadística descriptiva (frecuencia relativa) para los rangos de cada propiedad del suelo. La correlación entre los valores de las propiedades físicas en primer momento y las propiedades químicas y física del suelo en segundo momento, se analizó mediante el coeficiente Rho de Spearman, considerando p-valores menores o iguales a 0.01. Para la tipificación de los sistemas de producción con características similares se empleó un análisis de agrupamiento jerárquico basado en 29 variables correspondientes a propiedades físicas y químicas del suelo. Para este análisis, primero se estandarizaron los datos; posteriormente, se utilizó el método de Ward con distancia euclidiana al cuadrado. Finalmente, se elaboró un dendograma de agrupamiento. Para la comparación entre grupos, en cada variable se determinó el valor mínimo y el valor máximo, y se calcularon el promedio y el error estándar de la media (EEM). Se utilizó el programa estadístico Jamovi, versión 2.3.28, para realizar el análisis de agrupamiento jerárquico y el análisis de correlación (Acosta et al., 2026). Asimismo, los gráficos de frecuencias relativas, valores mínimos, máximos, promedios y EEM se elaboraron en Microsoft Excel, versión 2019.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización de los sistemas de producción

El 40 % de los sistemas de producción de palma aceitera presentaron suelos con potencial de hidrogeniones (pH) moderadamente alcalinos (entre 7.9 y 8.4). Del mismo modo, el 40 % de los sistemas registraron una capacidad de intercambio catiónico en nivel medio (entre 15 y 25). En el 80 % de los sistemas se reconoció una acidez intercambiable baja en el suelo (menores al 50 %). Asimismo, el 70 % de los sistemas evidenciaron una saturación de bases alta (superior al 80 %). Igualmente, el 70 % de los sistemas

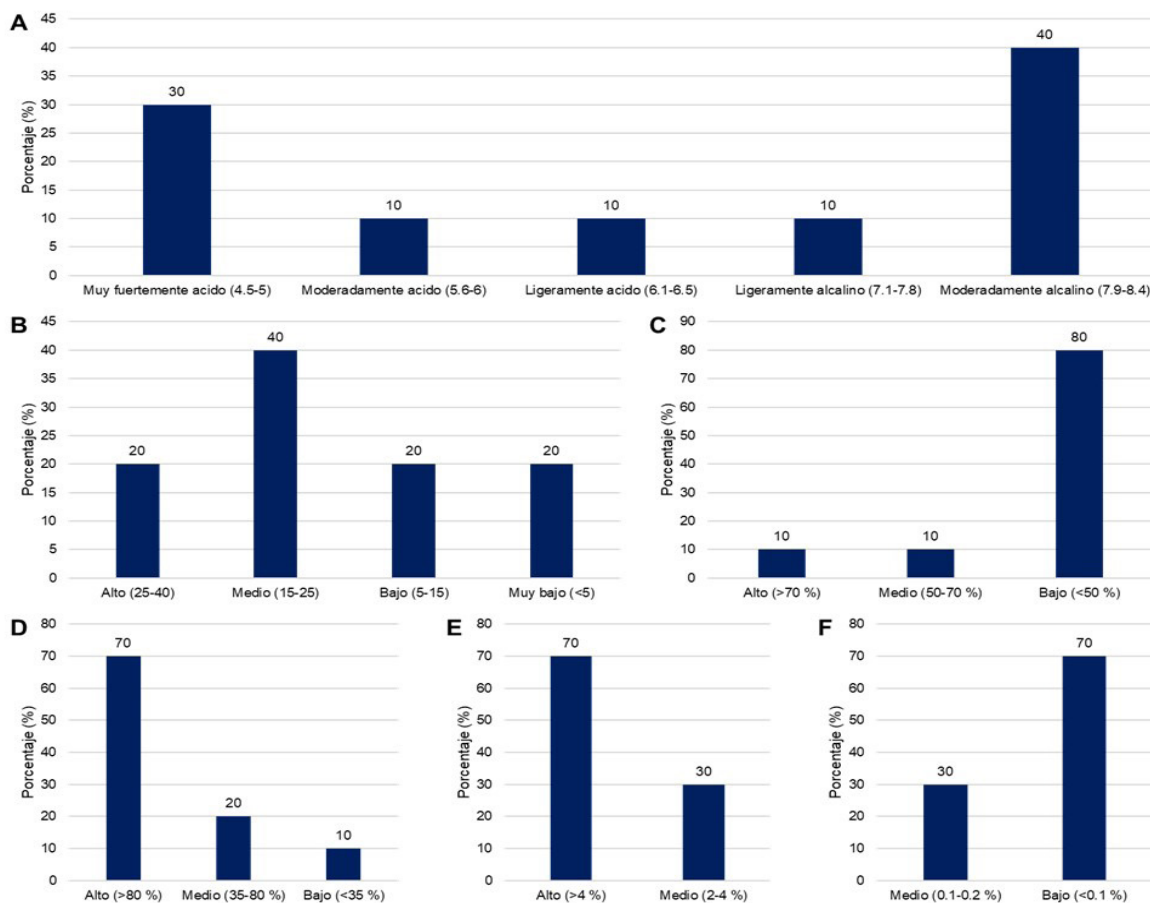
presentaron un contenido de MO alto (mayores al 4 %), mientras que el 70 % mostró un contenido de nitrógeno total bajo en el suelo (menores al 0.1 %) (Figura 2), lo que implica una limitada disponibilidad de nitrógeno y dependencia de aportes externos de fertilizantes o MO.

El 50 % de los sistemas de producción de palma aceitera presentaron niveles bajos de P disponible en el suelo (menores a 7 ppm), lo que evidencia una deficiencia de la disponibilidad del P en condiciones moderadamente alcalinas del suelo. El 60 % de los sistemas registraron niveles medios de K disponible (entre 100 y 240 ppm). El 70 % de los sistemas mostraron niveles altos de Ca disponible en el suelo (mayores a 10 me/100 g de suelo). Asimismo, el 50 % presentó niveles medios de Mg disponible en el suelo (entre 0.5 y 1.5 me/100 g de suelo). En cuanto a los micronutrientes, el 70 % de los sistemas evidenció niveles suficientes de Cu disponible (mayores iguales a 0.6 ppm) y el 90 % presentó niveles suficientes de Zn disponible en el suelo (mayores iguales a 1 ppm) (Figura 3).

Para conocer la relación existente entre las propiedades físicas del suelo en este tipo de sistema de producción, se realizó el análisis de correlación de Spearman (Tabla 2). Lo que evidenció relaciones fuertes y estadísticamente significativas entre algunas propiedades del suelo. La arena se asoció negativamente con el limo ($\rho = -0.879$, p-valor < 0.01) y con la CC, el PMP y AD ($\rho = -0.818$ y p-valor < 0.01 en los tres casos), lo que sugiere que estos suelos con más proporción de arena retienen menos agua y ofrecen menor disponibilidad hídrica. Chicas *et al.* (2014) determinaron que el contenido de arena y la densidad aparente son variables que explican la variación de la CC y PMP. En contraste, la arcilla se correlacionó positivamente y de manera intensa con la CC, PMP y AD ($\rho = 0.818$ y p-valor < 0.01 respectivamente). Se registró correlaciones perfectas y altamente significativas entre CC, PMP y AD ($\rho = 1$, p-valor < 0.001), lo cual sugiere una precisa dependencia entre estas propiedades hídricas del suelo. En cuanto a otras variables, Mariño y Rodríguez (2010) encontraron una correlación positiva entre el PMP, el porcentaje de macroporos, la CIC y la densidad aparente. La MO presentó correlaciones

Figura 2.

Propiedades edáficas químicas y física en los sistemas de producción de palma aceitera



Nota. Potencial de hidrogeniones (pH) (A). Capacidad de intercambio catiónico (B). acidez intercambiabile (C). Saturación de bases (D). Materia orgánica (E). Nitrógeno (N) total (F).

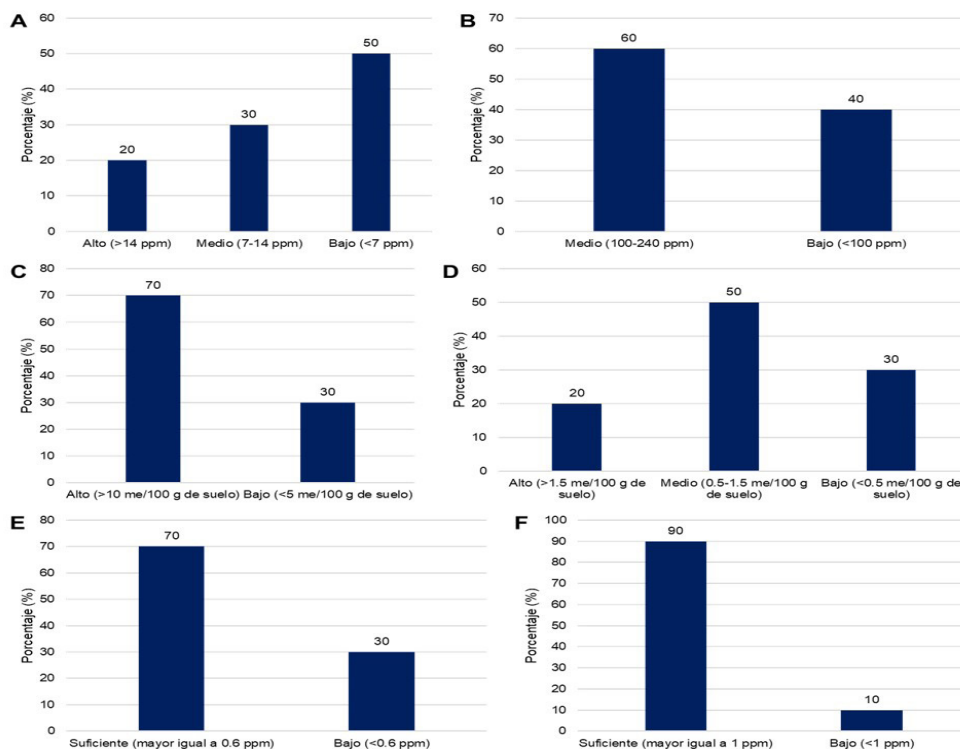
positivas y fuertes con la CC, PMP y AD ($\rho = 0.867$, p -valor < 0.01), indicando que su incremento mejora la capacidad de retención y disponibilidad de agua en los suelos bajo sistemas de producción de palma aceitera en Curimaná. Del mismo modo, Murray *et al.* (2011) y Murray *et al.* (2014) reportaron una relación positiva y directamente proporcional entre la MO, CC y la velocidad de infiltración.

Las correlaciones de Spearman evidenciaron relaciones estadísticamente sólidas entre varias propiedades químicas del suelo en estos sistemas (Curimaná) (Tabla 3). El pH se correlacionó positivamente con la CIC ($\rho = 0.865$, p -valor < 0.01) y con el Ca disponible ($\rho = 0.877$, p -valor < 0.001) y negativamente con el Fe ($\rho = -0.926$, p -valor < 0.001) y Mn disponible ($\rho = -0.902$, p -valor < 0.001), indicando que suelos más

básicos de estos sistemas presentan mayor CIC y Ca, pero menores contenidos disponibles de Fe y Mn. La CIC se relacionó positivamente con el Ca ($\rho = 0.976$, p -valor < 0.001), Na ($\rho = 0.824$, p -valor < 0.01) y Cu ($\rho = 0.863$, p -valor < 0.01) y negativamente con el Fe ($\rho = -0.939$, p -valor < 0.001), reflejando que suelos con mayor complejidad coloidal concentran bases intercambiables y microelementos como el Cu, pero tienden a reducir el Fe disponible. La conductividad eléctrica (CE) mostró relaciones positivas con la CIC ($\rho = 0.855$, p -valor < 0.01), Ca ($\rho = 0.842$, p -valor < 0.01) y Na disponible ($\rho = 0.768$, p -valor < 0.01) y negativas con el Mn ($\rho = -0.794$, p -valor < 0.01), sugiriendo asociación entre salinidad y acumulación de cationes básicos, junto con una disminución del Mn disponible. La MO se asoció fuertemente con el N total ($\rho = 0.994$,

Figura 3.

Elementos disponibles en el suelo en sistemas de producción de palma aceitera.



Nota. Fosforo (P) disponible (A). Potasio (K) disponible (B). Calcio (Ca) disponible (C). Magnesio (Mg) disponible (D). Cobre (Cu) disponible (E). Zinc (Zn) disponible (F).

p-valor < 0.001), K ($\rho = 0.842$, p-valor < 0.01), Mg ($\rho = 0.891$, p-valor < 0.01), Na ($\rho = 0.836$, p-valor < 0.01) y Cu disponible ($\rho = 0.857$, p-valor < 0.01), evidenciando su rol como central de reserva de N y en la retención de cationes. La relación MO, CIC y acidez es clave en suelos ácidos, puesto que cambios en la MO y CIC se asocian con variaciones en saturación de Al e H y, por tanto, en la severidad de la acidez intercambiable.

Para suelos tropicales cultivados, Cruz-Macías *et al.* (2020) encontraron que contenidos bajos de MO se asociaron con una mayor vulnerabilidad a procesos de acidificación y desequilibrios de intercambio.

Tipificación de los sistemas de producción

El análisis de agrupamiento jerárquico permitió la identificación de tres grupos mediante el método de

Tabla 2.

Correlación de Spearman entre propiedades físicas del suelo en sistemas de producción de palma aceitera.

Propiedades	Arcilla	Arena	Limo	CC	PMP	AD
Arena	-0.47					
Limo	0.15	-0.879**				
CC	0.818**	-0.818**	0.61			
PMP	0.818**	-0.818**	0.61	1***		
AD	0.818**	-0.818**	0.61	1***	1***	
MO	0.56	-0.77*	0.61	0.867**	0.867**	0.867**

Nota. * p < 0.05, ** p < 0.01, *** p < 0.001

Ward y utilizando la distancia euclidiana al cuadrado; estos grupos se caracterizan por una similitud interna y por las diferencias entre los sistemas que los conforman (Figura 4). El grupo I, conformado por tres sistemas de producción de palma aceitera, representó un 30 % del total y presentó un periodo vegetativo promedio de 13.67 años (EEM = 1.67). El grupo II también incluyó el 30 % de los sistemas, con un periodo vegetativo promedio de 10.33 años (EEM = 1.45). Por su parte, el grupo III fue el más representativo, ya que concentró el 40 % de los sistemas de producción y registró un periodo

vegetativo promedio de 14 años (EEM = 1.22).

Los suelos del grupo I presentaron condiciones edáficas potencialmente limitantes para el desarrollo de palma aceitera, caracterizados por un pH muy fuertemente ácido (4.83 ± 0.09), muy baja CIC (4.04 ± 0.76 me/100 g de suelo), alta acidez intercambiable (57.44 ± 7.24 %) y baja saturación de bases (42.56 ± 7.24 %), además de contenidos bajos de MO (0.67 ± 0.03 %) y nitrógeno total (0.03 %), aunque sin problemas de salinidad (CE = 0.09 ± 0.01 dS/m) (Tabla 4).

Tabla 3.

Correlación de Spearman entre propiedades físicas del suelo en sistemas de producción de palma aceitera.

Propiedades	pH	CE	CIC	MO	N total	P disp	K disp	Ca disp	Mg disp	Na disp	Cu disp	Fe disp	Mn disp
CE	0.755*												
CIC	0.865**	0.855**											
MO	0.497	0.552	0.685*										
N total	0.512	0.537	0.671*	0.994***									
P disp	0.178	0.176	0.2	0.539	0.567								
K disp	0.669*	0.576	0.697*	0.842**	0.872**	0.479							
Ca disp	0.877***	0.842**	0.976***	0.648*	0.652*	0.152	0.758*						
Mg disp	0.534	0.394	0.612	0.891**	0.896***	0.37	0.855**	0.624					
Na disp	0.608	0.768**	0.824**	0.836**	0.81**	0.378	0.818**	0.793**	0.669*				
Cu disp	0.751*	0.669*	0.863**	0.857**	0.859**	0.389	0.93***	0.875***	0.851**	0.882***			
Fe disp	-0.926***	-0.758*	-0.939***	-0.6	-0.604	-0.248	-0.661*	-0.927***	-0.624	-0.644*	-0.821**		
Mn disp	-0.902***	-0.794**	-0.867**	-0.527	-0.561	-0.2	-0.758*	-0.939***	-0.576	-0.632	-0.796**	0.903***	
Zn disp	-0.779**	-0.576	-0.6	0.055	0.037	-0.03	-0.248	-0.624	0.055	-0.285	-0.34	0.661*	0.697*

Nota. * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$

Tabla 4.

Potencial de hidrogeniones (pH). conductividad eléctrica (CE). capacidad de intercambio catiónico (CIC). acidez intercambiable. saturación de bases (SB). materia orgánica (MO) y nitrógeno total. en suelos de los sistemas de producción de palma aceitera tipificados. en Curimaná. Perú

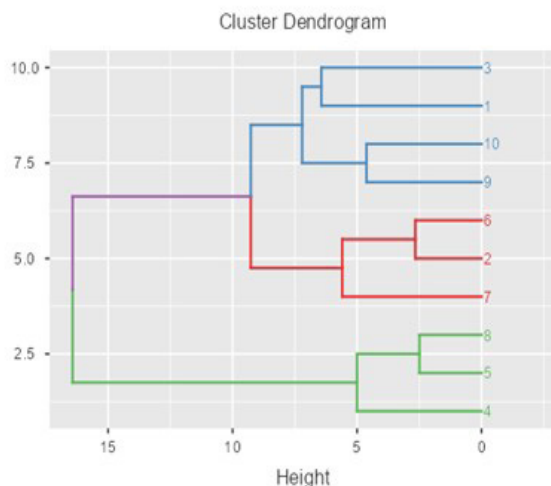
Propiedades del suelo	Grupo I		Grupo II		Grupo III	
	Media	E.E.M.	Media	EEM	Media	EEM
pH	4.83	0.09	7.9	0	7.05	0.55
CE (dS/m)	0.09	0.01	0.27	0.02	0.24	0.07
CIC (me/100 g de suelo)	4.04	0.76	22.1	0.89	20.84	4.35
Acidez intercambiable (%)	57.44	7.24	0	0	0	0
SB (%)	42.56	7.24	100	0	100	0
MO (%)	0.67	0.03	1.3	0.05	2.31	0.29
N total (%)	0.03	0	0.07	0	0.12	0.01

Rivera et al. (2014) reportaron que, en suelos ácidos, el Al soluble es reconocido como uno de los principales factores limitantes del crecimiento radicular y de la absorción de nutrientes, en particular para palma, aunque las respuestas fisiológicas de tolerancia serían

ineficientes ante condiciones extremadamente ácidas. Asimismo, Suarez et al. (2015) reportaron que los suelos con tipología muy ácida, presentan altos niveles de Al y bajos contenidos de Ca, Mg y SB. Ante estas consideraciones, la gestión de la acidez mediante

Figura 4.

Tipos de sistemas de producción de palma aceitera, a partir del análisis de agrupamiento jerárquico



enmiendas potencialmente mejora el desempeño de este cultivo (Mahmud y Chong, 2022; Cristancho et al., 2011); lo que sustenta la corrección en ambientes edáficos como el del grupo I. En contraste, el grupo II correspondió a suelos moderadamente alcalinos (pH de 7.9), CIC de nivel medio (22.1 0.89 me/100 g de suelo), 100 % de saturación de bases, ausencia de acidez intercambiable y baja CE (0.27 0.02 dS/m), pero con bajo contenido de MO (1.3 0.05 %) y nitrógeno total (0.07 %) (Tabla 4). Sánchez et al. (2005) y Webb et al. (2015) reportaron que las fracciones de arcilla y la MO determinan la fertilidad potencial y la capacidad de almacenamiento de nutrientes, en consecuencia, suelos arenosos o de baja CIC requieren incorporación de enmiendas orgánicas para amortiguar las potenciales pérdidas nutrimentales y sostener la producción.

El grupo III presentó condiciones potencialmente favorables, con pH cercano a la neutralidad (7.05 0.55), CIC de nivel medio (20.84 4.35 me/100 g de suelo), 100 % de saturación de bases, sin acidez intercambiable, baja CE (0.24 0.07 dS/m) y los mayores contenidos de MO (2.31 0.29 %) y nitrógeno total (0.12 0.01 %) (Tabla 4), lo que sustentaría un mayor potencial productivo del cultivo. En estos contextos (grupos II y III) potencialmente se realizará

una compensación de P a niveles óptimos (debido a que el Ca precipita el P de la solución suelo) y el sostenimiento de la MO para minimizar la pérdida de la calidad del suelo (Pauli et al., 2014). En tal sentido, Pauli et al. (2014) informaron que la incorporación de MO incrementa los niveles del pH, carbono orgánico y N total, junto con mejoras de cationes intercambiables y reducción de Al intercambiable.

La fertilidad del suelo es diferenciada en los sistemas de producción de palma aceitera, el grupo I se caracterizó por una marcada acidez y baja fertilidad, con Ca cambiante de 1.35 me/100 g de suelo, Mg de 0.27 me/100 g de suelo y K de 0.07 me/100 g de suelo, junto con valores elevados de Al cambiante (1.92 me/100 g de suelo) y H cambiante (0.42 me/100 g de suelo), lo que evidencia un ambiente químico potencialmente restrictivo para el cultivo; además, el P disponible medio (10.73 ppm) y el K disponible apenas alcanzó 30.51 ppm, aunque presentó concentraciones muy altas de Fe (123.2 ppm) y Mn (75.17 ppm), potencialmente tóxicas en condiciones ácidas (Tabla 5).

En el cultivo de palma, Owen (1995) reportó que un ambiente edáfico (pH, CIC, MO y arcilla) condiciona la absorción de nutrientes, y que el Al interfiere potencialmente en la absorción de P, Ca y Mg por este cultivo. Además, la presencia de Fe y Mn muy altos en este grupo es particularmente relevante, dado que, en condiciones ácidas, la solubilidad del Mn puede incrementarse y contribuir a la toxicidad, conjuntamente con desórdenes en la nutrición vegetal. Rivera et al. (2014) reportan que exposiciones a Al en palma alteran la absorción de nutrientes y la participación de Mn y Fe están involucrados en los desbalances nutrimentales, lo que sustenta una condición edáfica negativa del grupo I, no solo por el pH. En contraste, el grupo II mostró suelos de mayor fertilidad, con Ca cambiante de 21 me/100 g de suelo, Mg de 0.91 me/100 g de suelo y K de 0.18 me/100 g de suelo, ausencia de Al e H cambiables, y mayores niveles de K disponible (108.77 ppm) y Ca disponible (23.68 me/100 g de suelo), niveles medio y alto respectivamente, con P disponible relativamente medio (7.27 ppm) y Mn suficiente (8.97 ppm) (Tabla

Tabla 5.*Elementos cambiables, soluble y disponibles, en suelos de los sistemas de producción de palma aceitera*

Elementos cambiables, soluble y disponibles del suelo	Grupo I		Grupo II		Grupo III	
	Media	EEM	Media	EEM	Media	EEM
Ca cambiable (meq/100 g de suelo)	1.35	0.35	21	0.9	19.26	4.32
K cambiable (meq/100 g de suelo)	0.07	0.02	0.18	0.02	0.26	0.03
Mg cambiable (meq/100 g de suelo)	0.27	0.07	0.91	0.14	1.3	0.15
Na cambiable (meq/100 g de suelo)	0.01	0	0.01	0	0.02	0
Al cambiable (meq/100 g de suelo)	1.92	0.4	0	0	0	0
H cambiable (meq/100 g de suelo)	0.42	0.11	0	0	0	0
B soluble (ppm)	0.43	0.15	0.3	0.06	0.38	0.08
P disponible (ppm)	10.73	7.03	7.27	1.09	20	12.04
K disponible (ppm)	30.51	5.98	108.77	6.64	145.21	14.15
Ca disponible (meq/100 g de suelo)	1.54	0.37	23.68	0.47	23.65	4.4
Mg disponible (meq/100 g de suelo)	0.31	0.07	1.05	0.18	1.69	0.24
Na disponible (meq/100 g de suelo)	0.02	0	0.04	0	0.07	0.02
Cu disponible (ppm)	0.09	0	1.27	0.15	1.65	0.27
Fe disponible (ppm)	123.2	3.52	43.03	3.61	68.03	16.86
Mn disponible (ppm)	75.17	14.84	8.97	1.68	16.75	4.4
Zn disponible (ppm)	2.8	0.38	1.17	0.19	2.88	0.9

5). El P disponible en nivel medio sugiere una posible limitación, que en palma es crucial debido a que el cultivo extrae nutrientes continuamente y este consumo debe ser sostenido. Salgado-García *et al.* (2023) reportan que la demanda de N, P y K por el cultivo debe ser respuesta para la mantención de una producción continuada. El grupo III presentó las mejores condiciones nutricionales, con Ca cambiable de 19.26 me/100 de suelo, Mg de 1.3 me/100 g de suelo, K de 0.26 me/100 g de suelo, P disponible de 20 ppm (nivel alto) y K disponible de 145.21 ppm (nivel medio), sin presencia de acidez intercambiable, aunque con mayor variabilidad (E.E.M.) en varios nutrientes (Tabla 5). Esto respalda la hipótesis de mayor potencial productivo y evidencia el sostenimiento de la calidad de suelo, para esta tipología de sistemas (Pauli *et al.*, 2014; Webb *et al.*, 2015). Estos resultados, confirman que el grupo I requiere encalado y fertilización balanceada, mientras que los grupos II y III son más aptos para el cultivo, requiriendo ajustes específicos principalmente fósforo y algunos micronutrientes.

Los suelos de los sistemas presentaron diferencias

físicas entre grupos, el grupo I presentó una textura franca con 13.7 % de arcilla, 41 % de arena y 45.3 de limo, una CC de 17.48 % y un PMP de 9.36 %, lo que resulta en un AD de 8.12 %. Para esta condición edáfica, Pérez y Pérez (2023) indican que un mal manejo podría deteriorar las propiedades fisicoquímicas del suelo, de manera que integrar agrotécnicas sustentables es clave. El grupo II, con menor arcilla (10 %), 32.5 % de arena y mayor proporción de limo (57.5 %), mantiene valores similares de CC (17.48 %) y PMP (9.36 %), pero con alta variabilidad, indicando heterogeneidad del suelo; en contraste. En este sentido, se requiere un programa de nutrición ajustado a la demanda del cultivo y condiciones del suelo (Salgado-García *et al.*, 2023). El grupo III mostró mayor contenido de arcilla (21.92 %) y limo (55.73 %) y menor arena (22.37 %), lo que se reflejó en una mayor CC (22.68 %), un PMP de 12.63 % y un mayor contenido de AD (10.05 %) (Tabla 6), sugiriendo mejores condiciones de retención y suministro hídrico para el cultivo, aunque con potencial riesgo de drenaje limitado. Pauli *et al.* (2014) y Webb *et al.* (2015) reportan que

Tabla 6.*Propiedades físicas de suelos de los sistemas de producción de palma aceitera tipificados, en Curimaná, Perú*

Propiedades físicas del suelo	Grupo I		Grupo II		Grupo III	
	Media	EEM	Media	EEM	Media	EEM
Arcilla (%)	13,7	1,89	10	1,46	21,92	2,57
Arena (%)	41,02	2,18	32,49	10,14	22,37	2,69
Limo (%)	45,27	1,12	57,5	8,8	55,73	4,17
Capacidad de campo (CC, % de humedad gravimétrica)	17,48	0,88	17,48	1,85	22,68	0,8
Punto de marchitez permanente (PMP, % de humedad gravimétrica)	9,36	0,55	9,36	1,16	12,63	0,51
Agua disponible (AD, % de humedad gravimétrica)	8,12	0,33	8,12	0,69	10,05	0,3

este tipo de sistema bajo las condiciones edáficas encontradas tienden a un mayor nivel productivo, siempre que el manejo evite una compactación y se mantenga la incorporación de biomasa vegetal para evitar el deterioro físico del suelo. Cabe agregar que, un mayor nivel de humedad en el suelo favorece la disolución y acumulación de sales, especialmente Na (Cortés et al., 2013).

Conclusiones

En los sistemas de producción de palma aceitera estudiados predominan suelos con pH neutro a moderadamente alcalino, alta saturación de bases y niveles elevados de Ca y Mg intercambiables, acompañados de MO relativamente alta, pero con bajo contenido de N total, lo que evidencia una limitación nutricional específica y sugiere aportes externos de N. Además, una disponibilidad limitada de P en una proporción importante de sistemas, asociada a condiciones de pH moderadamente alcalinas. El análisis de correlación, destacó una relación positiva de la arcilla y MO con la CC y el agua disponible; de igual modo, se evidenció que suelos más ácidos presentan mayores concentraciones de Fe y Mn, mientras que suelos con mayor saturación de bases concentran Ca, Mg y Na. La caracterización diferenció tres grupos de sistemas, reflejando diferenciados niveles de aptitud

productiva y de estado de conservación del suelo. El grupo I (30 %), con plantaciones de 13.67 1.67 años, presentó suelos muy fuertemente ácidos (pH 4.83), muy bajo CIC (4.04 me/100 g de suelo) y bajos contenidos de MO (0.67 %) y nitrógeno (0.03 %), configurando un ambiente edáfico restrictivo. El grupo II (30 %), con sistemas de periodos vegetativos menores (10.33 1.45 años), mostró suelos moderadamente alcalinos (pH próximos a 7.9) y CIC de nivel medio (22.1 me/100 g de suelo), pero con baja MO (1.3 %) y fósforo disponible. En contraste, el grupo III (40 %), con mayor periodo vegetativo (14 1.22 años), presentó las condiciones más favorables, con pH neutro (7.05), CIC de nivel medio (20.84 me/100 g de suelo), mayor MO (2.31 %) y nitrógeno (0.12 %), además de mejor retención hídrica (10.05 % de AD), lo que sugiere una tendencia a mejores condiciones del suelo en sistemas con mayor periodo de establecimiento del cultivo, sin implicancia de causalidad directa.

BIBLIOGRAFÍA

Acosta Trinidad, LT; Huerta Cecilio, ND; Acosta Huaman, GC; Cespedes Ratto, JB; Cabello Sacramento, PJ; Arizapana Soto, N. 2026. Caracterización y evaluación de la sustentabilidad de 42 fundos

- de cafeto en Oxapampa, Pasco, Perú. *Revista de Investigación en Ciencias Agronómicas y Veterinaria, ALFA* 10(28): 185-199. <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v10i28.427>
- Ayala, IM; Rey, L; Carlos, DQ. 2004. Efecto de la densidad de siembra sobre el crecimiento, desarrollo y productividad de dos materiales de palma de aceite *Elaeis guineensis* Jacq. *Palmas* 25: 66-73. Disponible en <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/1067/1067>
- Ayompe, LM; Nkongho, RN; Acobta, AN; Masso, C; Egoh, BN. 2025. Transforming palm oil production: sustainable techniques and waste management strategies for Cameroon's smallholder farmers. *Frontiers Sustainable Food Systems* 9: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1606323>
- Bohn, HL; Mcneal, BL; O'connor, GA. 2001. *Soil chemistry* (3.^a ed.). John Wiley & Sons. 307 p.
- Chicas Soto, RA; Vanegas Chacón, EA; García Álvarez, N. 2014. Determinación indirecta de la capacidad de retención de humedad en suelos de la subcuenca del río Torjá, Chiquimula, Guatemala. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias* 23(1): 41-46.
- Chico Ruíz, J; Cerna Rebaza, L; Hernández Villalobos, K; Silva Pereda, L; Vasqueéz Cunha, F. 2018. Efecto del aluminio y el pH en el crecimiento de raíces de *Phaseolus vulgaris* var. Caballero en condiciones de laboratorio. *REBIOL* 36(2): 4-15. Disponible en <https://revistas.unitru.edu.pe/index.php/faccbbiol/article/view/1696>
- Chuchon-Remon, R; Solórzano, R; Cruz, J; Vallejos-Torres, G. 2026. Agroecosystems with greater canopy cover increase soil organic carbon density and reduce soil erodibility in the Peruvian Amazon. *Frontiers in Agronomy* 8: 1-15. <https://doi.org/10.3389/fagro.2026.1769313>
- Corley, RHV; Tinker, PB. 2015. *The oil palm* (5.^a ed.). Wiley. Disponible en <https://acortar.link/doO6Ka>
- Cortés, D; Pérez, J; Camacho Tamayo, J. 2013. Relación espacial entre la conductividad eléctrica y algunas propiedades químicas del suelo. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica* 16(2): 401-408. <https://doi.org/10.31910/rudca.v16.n2.2013.912>
- Cristancho, JA; Hanafi, MM; Syed Omar, SR; Rafii, MY. 2011. Alleviation of soil acidity improves the performance of oil palm progenies planted on an acid Ultisol. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B - Soil and Plant Science* 61(6): 487-498. <https://doi.org/10.1080/09064710.2010.506448>
- Cruz-Macías, WO; Rodríguez-Larramendi, LA; Salas-Marina, MA; Hernández-García, V; Campos-Saldaña, RA; Chávez-Hernández, MH; Gordillo-Curiel, A. 2020. Effect of organic matter and cation exchange capacity on the acidity of soils cultured with corn in two regions of Chiapas, México. *Revista Terra Latinoamericana* 38(3): 475-480. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i3.506>
- Daly, EJ; Kim, K; Hernandez-Ramirez, G; Klimchuk, K. 2023. The response of soil physical quality parameters to a perennial grain crop. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 343: 108265. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108265>
- de Oliveira, EA; Feldpausch, TR; Marimon, BS; Morandi, PS; Phillips, OL; Bird, M; Murakami, AA; Arroyo, L; Quesada, CA; Marimon-Junior, BH. 2022. Soil pyrogenic carbon in southern Amazonia: Interaction between soil, climate, and above-ground biomass. *Frontiers in Forests and Global Change* 5: 880963. DOI: <https://doi.org/10.3389/ffgc.2022.880963>
- Furcal-Beriguete, P; Robles-Argüello, Z; Salazar-Díaz, R. 2023. Evaluación de la fertilidad de los suelos en sistemas agroforestal con palma Africana (*Elaeis guineensis* Jacq.). *Revista Tecnología En Marcha* 36(2): 20-31. DOI: <https://doi.org/10.18845/tm.v36i2.5903>
- Guillaume, T; Damris, M; Kuzyakov, Y. 2015. Losses of soil carbon by converting tropical forest to plantations: erosion and decomposition estimated by $\delta^{13}\text{C}$. *Global Change Biology* 21: 3548-3560. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.12907>
- Hergoualc'h, K; López Gonzales, M; Málaga, N; Martius, C. 2025. Conversion of degraded forests to oil

- palm plantations in the peruvian amazonia: shifts in soil and ecosystem-level greenhouse gas fluxes. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 386: 109603. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2025.109603>
- Hillel, D. 2003. *Introduction to environmental soil physics*. Academic Press. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-348655-4.X5000-X>
- Kamarudheen, P; Mayadevi, MR; Smitha, JK; Beena, VI; Jayasree, P; Sandeep, S; Archana, K; Aryadevi, JS. 2025. Iron-acidity interactions in hydromorphic rice systems of south western coastal India. *Discover Soil* 2(84): 1-20. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44378-025-00110-y>
- Kurniawan, S; Corre, MD; Matson, AL; Schulte-Bisping, H; Utami, SR; van Straaten, O; Veldkamp, E. 2018. Conversion of tropical forests to smallholder rubber and oil palm plantations impacts nutrient leaching losses and nutrient retention efficiency in highly weathered soils. *Biogeosciences* 15: 5131-5154. DOI: <https://doi.org/10.5194/bg-15-5131-2018>
- Lal, R. 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science* 304(5677): 1623-1627. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1097396>
- Mahmud, MS; Chong, KP. 2022. Effects of liming on soil properties and its roles in increasing the productivity and profitability of the oil palm industry in Malaysia. *Agriculture* 12(3): 322. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12030322>
- Mariño Macana, YA; Rodríguez Melo, MA. 2010. El punto de marchitez permanente (PMP) en melina (*Gmelina arborea* L. Roxb.) para la Costa Caribe colombiana ¿una característica para la selección de clones?. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria* 11(2): 116-121. DOI: https://doi.org/10.21930/rcta.vol11_num2_art:201
- Minasny, B; Hartemink, AE. 2011. Predicting soil properties in the tropics. *Earth-Science Reviews* 106(1-2): 52-62. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.01.005>
- Murray Núñez, RM; Bojórquez Serrano, JI; Hernández Jimenez, A; Orozco Benítez, MG; García Paredes, JD; Gómez Aguilar, R; Ontiveros Guerra, HM; Aguirre Ortega, J. 2011. Efecto de la materia orgánica sobre las propiedades físicas del suelo en un sistema agroforestal de la llanura costera norte de Nayarit, México. *Revista Bio Ciencias* 1(3): 27-35. Handle: <http://dspace.uan.mx:8080/jspui/handle/123456789/583>
- Murray, RM; Orozco, MG; Hernández, A; Lemus, C; Nájera, O. 2014. El sistema agroforestal modifica el contenido de materia orgánica y las propiedades físicas del suelo. *Avances en Investigación Agropecuaria* 18(1): 23-31. Handle: <http://dspace.uan.mx:8080/jspui/handle/123456789/415>
- Nelson, P. 2023. Sustainable soil management in tropical agriculture. En S. Jayaraman, R. C. Dalal y R. Lal (Eds.), *Sustainable soil management: beyond food production*. (pp. 204-239). Cambridge Scholars Publishing.
- Omenda, JA; Ngetich, KF; Kiboi, MN; Mucheru-Muna, MW; Mugendi, DN. Phosphorus availability and exchangeable aluminum response to phosphate rock and organic inputs in the Central Highlands of Kenya. *Heliyon* 7(3): e06371. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06371>
- Owen Barletto, EJ. 1995. Características físicoquímicas del suelo y su incidencia en la absorción de nutrimentos, con énfasis en el cultivo de la palma de aceite. *Palmas* 16(1): 31-39. Disponible en <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/461>
- Passioura, J. 2006. Increasing crop productivity when water is scarce-from breeding to field management. *Agricultural Water Management* 80(1-3): 176-196. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.07.012>
- Pauli, N; Donough, C; Oberthür, T; Cock, J; Verdooren, R; Rahmadsyah; Abdurrohman, G; Indrasuara, K; Lubis, A; Dolong, T; Pasuquin, JM. 2014. Changes in soil quality indicators under oil palm plantations following application of 'best management practices' in a four-year field trial. *Agriculture, Ecosystems*

- & *Environment* 195: 98-111. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.05.005>
- Peele, TC; Beale, OW. 1950. Relation of moisture equivalent to field capacity and moisture retained at 15 atmospheres pressure to the wilting percentage. *Agronomy Journal* 42(12): 604-607. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj1950.00021962004200120006x>
- Pérez Hernández, H; Pérez Sato, M. 2023. ¿La palma aceitera (*Elaeis guineensis*) genera un impacto negativo sobre el suelo? una revisión. *Agronomía Mesoamericana* 34(1): 50301. DOI: <https://doi.org/10.15517/am.v34i1.50301>
- Pérez-Sato, M; Gómez-Gutiérrez, A; López-Valdez, F; Ayala-Niño, F; Soni-Guillermo, E; González-Graillet, M; Pérez-Hernández, H. 2023. Soil physicochemical properties change by age of the oil palm crop. *Heliyon* 9: e16302. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16302>
- Porta, J; López-Acevedo, M; Poch, RM. 2013. *Edafología: uso y protección de suelos* (3.ª ed.). Ediciones Mundi-Prensa.
- Quesada, CA; Lloyd, J; Anderson, LO; Fyllas, NM; Schwarz, M; Czimczik, CI. 2011. Soils of Amazonia with particular reference to the RAINFOR sites. *Biogeosciences* 8: 1415-1440. DOI: <https://doi.org/10.5194/bg-8-1415-2011>
- Regasa, A; Haile, W; Abera, G. 2025. Effects of lime and vermicompost application on soil physicochemical properties and phosphorus availability in acidic soils. *Scientific Reports* 15(1): 25544. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-02053-4>
- Rivera Méndez, YD; Moreno Chacón, AL; Herrera Corzo, M; Romero Angulo, HM. 2016. La toxicidad por aluminio (Al³⁺) como limitante del crecimiento y la productividad agrícola: el caso de la palma de aceite. *Palmas* 37(1): 11-23. Disponible en <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/11696>
- Rivera Méndez, YD; Moreno Chacón, AL; Romero Angulo, HM. 2014. Response of the roots of oil palm O×G interspecific hybrids (*Elaeis oleifera* × *Elaeis guineensis*) to aluminum (Al³⁺) toxicity. *Australian Journal of Crop Science* 8(11): 1526-1533. Disponible en <https://acortar.link/GUL6Xy>
- Roy, RN; Finck, A; Blair, GJ; Tandon, HLS. 2006. Soil fertility and crop production. En *Plant nutrition for food security: a guide for integrated nutrient management*. (pp. 43-90). Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO).
- Salgado-García, S; Palma-López, DJ; Zavala-Cruz, J; Lagunes-Espinoza, LC; Córdova-Sánchez, S; Castelán-Estrada, M; Ortiz-García, CF; Rincón-Ramírez, JA; Salgado-Velázquez, S. 2023. Fertilización y nutrición sustentable de palma de aceite (*Elaeis guineensis*) en Tabasco, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 10(1): e3082. DOI: <https://doi.org/10.19136/era.a10n1.3082>
- Sánchez, B; Ruiz, M; Ríos, MM. 2005. Materia orgánica y actividad biológica del suelo en relación con la altitud, en la cuenca del río Maracay, estado Aragua. *Agronomía Tropical* 56(4): 507-534.
- Sanchez, PA. 1976. *Properties and management of soils in the tropics*. En Wiley.
- Sanchez, PA. 2019. Soils of the tropics. En *Properties and management of soils in the tropics*. (pp. 82-119). Cambridge University Press. DOI: <https://doi.org/10.1017/9781316809785>
- SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú). 2025. *Datos Hidrometeorológicos a Nivel Nacional*. Disponible en <https://acortar.link/q0ROGT>
- Sparks, DL. 2003. *Environmental Soil Chemistry* (2.ª ed.). Academic Press. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-656446-4.X5000-2>
- Sterling, F; Arias, E; Richardson, D. 2007. Efecto de varias densidades de siembra sobre el comportamiento de cuatro materiales comerciales de palma aceitera. *Palmas* 28: 207-212. Disponible en <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/1257/1257>
- Suárez Salazar, JC; Rodríguez Burgos, E; Duran Bautista, EH. 2015. Efecto de las condiciones de cultivo, las

- características químicas del suelo y el manejo de grano en los atributos sensoriales de café (*Coffea arabica* L.) en taza. *Acta Agronómica* 64(4): 342-348. DOI: <https://doi.org/10.15446/acag.v64n4.44641>
- Syers, JK; Rimmer, DL. (Eds.). 1994. *Soil science and sustainable land management in the tropics*. CAB International. 320 p.
- van der Sande, MT; Powers, JS; Kuyper, TW; Norden, N; Salgado-Negret, B; Silva de Almeida, J; Bongers, F; Delgado, D; Dent, DH; Derroire, G; do Espirito Santo, MM; Dupuy, JM; Fernandes, GW; Finegan, B; Gavito, ME; Hernández-Stefanoni, JL; Jakovac, CC; Jones, IL; das Dores Magalhanes, M; Meave, JA; Mora, F; Muñoz, R; Pérez-Cárdenas, N; Piotto, D; Álvarez-Dávila, E; Caceres-Siani, Y; Dalban-Pilon, C; Dourdian, A; Du, DV; García Villalobos, D; Nunes, YF; Sanchez-Azofeifa, A; Poorter, L. 2022. Soil resistance and recovery during neotropical forest succession. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B: Biological Sciences* 378. DOI: <https://doi.org/10.1098/rstb.2021.0074>
- Villacis Fajardo, JD; Almeida Fonseca, R; Amaral Cardoso, JC; Vieira Maia, MA; Ramos Azevedo, MM; Taube, PS; Bessa Lopes, R; Amorim Silva do Sacramento, JA; Cristi de Barros, E; Tello Espinoza, R; Villacis Fajardo, NA. 2021. Atributos químicos de suelo en sistemas de usos diferente, Itacoatiara-AM, Brasil. *Folia Amazónica* 30(1): 49-59. DOI: <https://doi.org/10.24841/fa.v30i1.527>
- Webb, MJ; Nelson, PN; Bessou, C; Caliman, JP; Sutarta, ES. 2015. *Sustainable management of soil in oil palm plantings*. Australian Centre for International Agricultural Research. Disponible en <https://acortar.link/8OzM2u>
- Weil, RR; Brady, NC. 2017. *The nature and properties of soils* (15.^a ed.). Pearson. 1086 p.
- Xing, Y; Wang, X; Mustafa, A. 2025. Exploring the link between soil health and crop productivity. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 289: 117703. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.117703>
- Yepes Orjuela, RH. 2019. Nutrición y fertilización con micronutrientes y su efecto en palmade aceite (*Elaeis guineensis* Jack): revisión. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria* 4(2): 93-110. DOI: <https://doi.org/10.24054/cyta.v4i2.1068>
- Yupanqui Carrasco, O; Julca Torres, JR; Valerio Candia, E. 2021. Estimación de la superficie cultivada de palma aceitera mediante interpretación visual de imágenes satelitales durante los años 2016-2020. *Revista Xilema* 31(1): 32-45. Disponible en <https://acortar.link/A3zomt>
- Zavaleta Garcia, A. 1992. *Edafología: el suelo en relación con la producción*. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. 223 p.

Artículo recibido en: 30 de marzo del 2026

Aceptado en: 21 de abril del 2026