



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE BABAHOYO
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS



ESCUELA DE AGRICULTURA, SILVICULTURA, PESCA Y
VETERINARIA
CARRERA DE AGRONOMÍA

TRABAJO DE TITULACIÓN

Componente práctico del Examen de carácter Complexivo, presentado al
H. Consejo Directivo de la Facultad, como requisito previo para obtener
el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO

TEMA:

Efectos de la compactación de los suelos arcillosos en el desarrollo y
producción del cultivo de palma aceitera *Elaeis guineensis Jacq.*

AUTOR:

Erick Manuel Jiménez Caballero

TUTOR:

Ing. Agr. Marlon López Izurieta, MSc.

Babahoyo- Los Ríos - Ecuador

2024

RESUMEN

Los suelos arcillosos tienen a sufrir un alto grado de compactación debido al uso intensificado de métodos estáticos en los sistemas productivos; por ende la compactación es uno de los primeros procesos de degradación, debido al colapso de las propiedades físicas del suelo como la densidad, espacio poroso y estructura, provocando que la planta disminuya su crecimiento radicular y por ende la posibilidad de obtener más nutrientes, agua y aire; además el suelo exhibe escorrentía superficial, endurecimiento y mala aireación. La información obtenida fue parafraseada, resumida y analizada en la cual se obtuvo información relevante sobre los efectos de la compactación de los suelos arcillosos en el desarrollo y producción del cultivo de palma aceitera (*E. guineensis*). Por lo anteriormente detallado, se determinó que la compactación es uno de los principales problemas que pueden ocurrir en los suelos donde se cultiva palma aceitera, incluida la pérdida de porosidad causada por fuerzas externas que exceden la capacidad de carga del suelo. Las principales labores culturales que causan la compactación en suelos arcillosos son la fertilización, control de malezas, la caída de los racimos durante la cosecha y la cosecha, debido al tráfico de maquinarias durante las operaciones de cultivo de palma aceitera. La compactación de suelos arcillosos es un factor determinante en la distribución radicular, el crecimiento de la palma aceitera y su correcto desarrollo; en la cual se ha encontrado efectos negativos en el desarrollo de la raíz cuando la resistencia a la penetración del suelo. Las mejores plantaciones de palma aceitera se cultivan en suelos sin barreras físicas, químicas o biológicas para un buen desarrollo de las raíces; la mala aireación del suelo y la baja fertilidad provocan desequilibrios de nutrientes en las plantas que afectan gravemente la calidad y cantidad de los sistemas radiculares.

Palabras claves: Compactación, degradación, producción, palma aceitera

SUMMARY

Clay soils tend to suffer a high degree of compaction due to the intensified use of static methods in production systems; Therefore, compaction is one of the first degradation processes, due to the collapse of the physical properties of the soil such as density, pore space and structure, causing the plant to reduce its root growth and therefore the possibility of obtaining more nutrients, water. and air; In addition, the soil exhibits surface runoff, hardening and poor aeration. The information obtained was paraphrased, summarized and analyzed in which relevant information was obtained on the effects of the compaction of clay soils on the development and production of oil palm cultivation (*E. guineensis*). From the above, it was determined that compaction is one of the main problems that can occur in soils where oil palm is grown, including the loss of porosity caused by external forces that exceed the bearing capacity of the soil. The main cultural tasks that cause compaction in clay soils are fertilization, weed control, the falling of bunches during harvest and harvesting, due to machinery traffic during oil palm cultivation operations. The compaction of clay soils is a determining factor in root distribution, the growth of oil palm and its correct development; in which negative effects have been found on root development when resistance to soil penetration. The best oil palm plantations are grown in soils without physical, chemical or biological barriers to good root development; Poor soil aeration and low fertility cause nutrient imbalances in plants that seriously affect the quality and quantity of root systems.

Keywords: Compaction, degradation, production, oil palm

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	II
SUMMARY	III
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VI
1. CONTEXTUALIZACIÓN	1
1.1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.3. JUSTIFICACIÓN	3
1.4. OBJETIVOS.....	4
1.4.1. Objetivo General	4
1.4.2. Objetivos Específicos.....	4
1.5. LINEAS DE INVESTIGACIÓN	4
2. DESARROLLO.....	5
2.1. MARCO CONCEPTUAL	5
2.1.1. Suelos arcillosos	5
2.1.1.1. Características de los suelos arcillosos	5
2.1.1.1.1. Propiedades de las arcillas	5
2.1.1.1.2. Textura.....	5
2.1.1.1.3. Porosidad: permeabilidad y aireación.....	6
2.1.1.1.4. Composición.....	6
2.1.1.1.5. Propiedad de expansión y contracción.....	7
2.1.2. Importancia de la compactación del suelo.....	7
2.1.3. Compactación de los suelos arcillosos	8
2.1.3.1. Condiciones físicas de compactación de un suelo arcilloso	9
2.1.3.2. Síntomas de compactación en suelos arcillosos	11
2.1.3.3. Factores que producen la compactación en los suelos arcillosos	12
2.1.4. Principales labores culturales que causan la compactación en suelos arcillosos.....	13
2.1.4.1. Compactación del suelo arcillosos por maquinaria pesada.....	13
2.1.4.2. Control de malezas.....	13
2.1.4.3. Fertilización.....	14
2.1.4.4. Poda y corte de racimo	15
2.1.5. Principales efectos de la compactación de suelos arcillosos en la producción de palma aceitera.....	15

2.1.6.	Remediación de suelos arcillosos compactados	18
2.1.6.1.	Remediación mediante herramientas mecánicas	18
2.1.6.1.1.	Remediación por métodos biológicos.....	18
2.1.6.1.2.	Remediación por métodos químicos	18
2.2.	METODOLOGÍA.....	19
2.3.	RESULTADOS	20
2.4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	22
3.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	23
3.1.	CONCLUSIONES.....	23
3.2.	RECOMENDACIONES.....	24
4.	REFERENCIAS Y ANEXOS.....	25
4.1.	REFERENCIAS	25
4.2.	ANEXOS.....	31

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pag
Figura 1. Suelo arcillos.....	31
Figura 2. Compactación de suelo arcilloso.....	31
Figura 3. Uso de maquinaria agrícola en el cultivo de palma aceitera.....	32

1. CONTEXTUALIZACIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN

La palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq.) se cultiva en climas tropicales y es originaria de África occidental; se compone de semillas oleaginosas perennes y tiene el mayor rendimiento de aceite por unidad de superficie, con mejor rendimiento a corto plazo que otras semillas de la misma especie; el cultivo puede alcanzar los 50 años y seguir produciendo, pero sólo es económicamente viable durante 25 años, ya que la recolección del fruto se vuelve cada vez más difícil, debido a la altura de su estipe (Mantuano 2023).

Dentro del sistema productivo del cultivo de palma aceitera el factor suelo es un recurso natural no renovable que se regenera muy lentamente y está constantemente expuesto a procesos de destrucción y degradación, siendo un elemento esencial en la producción aceitera ya que aporta agua y nutrientes al cultivo; además, interfiere con la circulación de agua, carbono, nitrógeno, fósforo y otros elementos de interés (Munevar 2019).

En el Ecuador la palma aceitera presenta en el 2022 una superficie cosechada de 141 381 hectáreas, registrando una disminución del 7,3 % con respecto al 2021; los cultivos de palma aceitera están localizados principalmente en la Región Costa; a pesar de la menor superficie cosechada, la producción anual fue de 2,3 millones de toneladas, presentado una disminución del 5,1 % respecto al año 2021; la provincia de Los Ríos presenta la mayor participación en cuanto a producción con el 33,6 % del total nacional (INEC 2022).

El cultivo de palma aceitera puede crecer y producir en una variedad de tipos de suelo, los suelos franco arenoso a franco arcilloso son los más adecuados para el crecimiento y el rendimiento; las raíces de los cultivos en las primeras etapas de desarrollo son sensibles a la dureza y compactación del suelo, lo que limita su crecimiento normal, por lo que los suelos con alta porosidad son los más adecuados en esta etapa; en suelo arcilloso (duro, pegajoso), se recomienda la preparación

mecánica con arados y rastras para la siembra o el trasplante; esta práctica dará a las raíces suficiente estructura y alta porosidad (Gutiérrez 2020).

La palma aceitera es un monocultivo que en el país se ha implementado de manera intensiva y con un manejo poco adecuado, en donde varias investigaciones han demostrado que las plantaciones de palma tienden a degradar las características fisicoquímicas de suelos arcillosos iniciando proceso de erosión y compactación, en una plantación de palma en Malasia donde se degradó 14 ha/año, provocando un colapso en el suelo (Pérez y Pérez 2023).

Los suelos arcillosos tienen a sufrir un alto grado de compactación debido al uso intensificado de métodos estáticos en los sistemas productivos; por ende la compactación es uno de los primeros procesos de degradación, debido al colapso de las propiedades físicas del suelo como la densidad, espacio poroso y estructura, provocando que la planta disminuya su crecimiento radicular y por ende la posibilidad de obtener más nutrientes, agua y aire; además el suelo exhibe escorrentía superficial, endurecimiento y mala aireación (Velázquez *et al* 2020).

Los suelos arcillosos están compuestos por el mineral arcilla, de textura pesada, de un mal drenaje, no requieren de mucho abono y son impermeables; están dentro del orden vertisoles; poseen diferentes tipos de arcillas tales como: Filosilicatos escamosos, moscovita, biotita, clorita, vermiculita, montmorillonita, óxidos de cuarzo, calcita, el yeso, la halita, cristobalita, materiales amorfos, el hierro y el aluminio; además el suelo arcilloso tiende a tener una mayor capacidad para retener nutrientes esenciales para las plantas, como minerales y elementos químicos; puede ayudar a retener la materia orgánica en el suelo, lo que contribuye a la fertilidad del suelo al proporcionar nutrientes y mejorar la estructura del suelo (Fernández 2020).

El presente trabajo se desarrolló para adquirir y mejorar los conocimientos sobre el análisis de los efectos de la compactación de los suelos arcillosos en el desarrollo y producción del cultivo de palma aceitera.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La compactación del suelo provoca el desgaste del rendimiento en la producción del cultivo de palma aceitera mediante la restricción del crecimiento de las raíces y la reducción de la circulación del aire y el agua en los suelos arcillosos.

Existen diversos tipos de suelos, como los arcillosos que pueden presentar horizontes con diferentes grados de compactación con menor escala, pero que puede cambiar debido a la aplicación intensiva del laboreo del suelo, en la cual se presentan serios problemas en el desarrollo y producción del cultivo de palma aceitera.

La estructura de las raíces juega un rol importante en la compactación del suelo arcilloso, donde se ha evidenciado que el suelo arcilloso con un cultivo de palma aceitera muestra una mayor resistencia mecánica de $5,6 \text{ kg/m}^2$ en comparación con plantaciones comerciales de teca ($3,38 \text{ kg m}^2$), y cacao ($3,19 \text{ kg m}^2$) (Pérez y Pérez 2023).

1.3. JUSTIFICACIÓN

Los problemas que ha traído consigo la compactación del suelo arcilloso en plantaciones de palma aceitera ha conllevado que el estudio de su calidad tenga mas relevancia, por ende, es importante conocer que las mejores plantaciones de palma aceitera se cultivan en suelos arcillosos que no tengan barreras físicas, químicas o biológicas que impidan un buen desarrollo radicular; la mala aireación del suelo y la baja fertilidad provocan desequilibrios de nutrientes en las plantas que afectan gravemente la calidad y cantidad de los sistemas radiculares.

El 65 % del total de raíces en diferentes materiales genéticos de palma aceitera se encuentran en los primeros 50 cm de suelo; a una distancia de 2 a 3 metros del tronco se acumulan raíces absorbentes; por eso es importante contrarrestar la compactación del suelo mediante prácticas agrícolas integradas y conceptos de gestión sostenible del suelo.

Por lo antes expuesto es importante conocer los efectos de la compactación de los suelos arcillosos en el desarrollo y producción del cultivo de palma aceitera (*Elaeis guineensis Jacq.*).

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo General

Describir los efectos de la compactación de los suelos arcillosos en el desarrollo y producción del cultivo de palma aceitera *Elaeis guineensis Jacq.*

1.4.2. Objetivos Específicos

- Identificar las principales labores culturales que causan la compactación en suelos arcillosos.
- Detallar los principales efectos de la compactación de suelos arcillosos en la producción de palma aceitera.

1.5. LINEAS DE INVESTIGACIÓN

La presente investigación está enfocada dentro de los dominios de la Universidad Técnica de Babahoyo de: Recursos Agropecuarios, ambiente, biodiversidad y Biotecnología. La temática de la presente investigación es “Efectos de la compactación de los suelos arcillosos en el desarrollo y producción del cultivo de palma aceitera *Elaeis guineensis Jacq.*”, el mismo que se encuentra enfocado en la línea de investigación: Desarrollo agropecuario, agroindustrial sostenible y sustentable y en la sublínea de: Conservación de suelos.

2. DESARROLLO

2.1. MARCO CONCEPTUAL

2.1.1. Suelos arcillosos

El suelo arcilloso presenta una composición principalmente de partículas con un diámetro inferior a 0,002 mm (llamada arcilla); si la proporción de arcilla es muy elevada se consideran suelos pesados por su gran densidad (Moro *et al.* 2019).

Los suelos arcillosos absorben y retienen más agua, lo que resulta en un drenaje deficiente y una aireación deficiente del suelo; se forman grumos al secar, lo que dificulta su uso en agricultura; la arcilla es muy importante para la fertilidad del suelo; retienen sales minerales formando agregados con humus (la parte coloidal de la materia orgánica descompuesta) y retienen bien la humedad (Venialgo *et al.* 2020).

Los mismos autores mencionan que los suelos arcillosos más típicos son del orden Vertisoles (arcillas expandibles); estos tipos de suelo son comunes en toda la tierra, donde se establecen especies con buenos rendimientos destacándose el arroz, la piña y el caucho.

2.1.1.1. Características de los suelos arcillosos

2.1.1.1.1. Propiedades de las arcillas

Las propiedades físicas y químicas de la arcilla dependen de su composición mineral, especialmente del tipo principal de arcilla; por ejemplo, el alofana es beneficioso para la capacidad de intercambio catiónico, la porosidad, la retención de humedad y la estructura; por otro lado, la caolinita tiene baja capacidad de intercambio catiónico, baja retención de elementos y estructura regular (Taboada *et al.* 2019).

2.1.1.1.2. Textura

La principal categoría que define un suelo como arcilloso es la textura; se refiere a la proporción de arena, limo y arcilla en el suelo y cada uno de estos elementos

entran en la categoría del tamaño de las partículas; si las partículas de arcilla constituyen del 25 al 45 por ciento del total de partículas de un suelo, se considera arcillo-arenoso, arcilloso grueso o arcilloso limoso; si la arcilla constituye más del 45 % de la composición total, se clasifica como arcilla fina (Gutiérrez 2020).

2.1.1.1.3. Porosidad: permeabilidad y aireación

El contenido de arcilla determina la textura y estructura del suelo y también afecta su porosidad; debido a que las partículas de arcilla tienen un diámetro menor, dejan poros muy pequeños; bloquea la circulación de agua y aire en la matriz del suelo; estas condiciones conducen a la saturación del suelo, lo que puede provocar el estancamiento del agua superficial porque no se produce infiltración (Gómez et al. 2020).

Los mismos autores expresan que si los poros del suelo se saturan de agua, la rizosfera se empobrece (falta de oxígeno); en estas condiciones, el desarrollo de la mayoría de las plantas cultivadas presenta serias dificultades; en presencia de humus, la arcilla muestra su lado positivo; el complejo arcilla-humus se forma con agregados de mayor tamaño, donde los poros también son más grandes, lo que permite una mayor permeabilidad y aireación.

La densidad aparente se refiere al peso seco del suelo por unidad de volumen de suelo inalterado, incluyendo los espacios porosos; los valores de densidad aparente dependen de muchos factores, como la textura, estructura y contenido de materia orgánica del suelo, así como el manejo del mismo (Taboada *et al.* 2019).

2.1.1.1.4. Composición

La mayoría de las arcillas son filosilicatos (silicatos en láminas); dependiendo del número de láminas que componen su estructura, existen diferentes tipos; las más comunes son moscovita, caolinita, biotita, clorita, vermiculita y montmorillonita; otros grupos arcillosos moderadamente abundantes son los óxidos de cuarzo; entre los minerales más raros encontramos feldespatos, hematita, goethita, calcita, yeso y halita;

la cristobalita y las sustancias amorfas se encuentran en arcillas de origen piroclástico (ceniza volcánica) (Cadena *et al.* 2021).

Los mismos autores mencionan que debido a la naturaleza coloidal de las partículas, la arcilla retiene una gran cantidad de minerales; las arcillas tienden a retener hierro (Fe) y en menor medida aluminio (Al); dado que la arcilla retiene una gran cantidad de agua, se produce un proceso de oxidación; el óxido de hierro hidratado confiere a estos suelos un color amarillo o rojizo.

2.1.1.1.5. Propiedad de expansión y contracción

Debido a que la arcilla tiene una alta capacidad de retención de agua, está sujeta a contracción y expansión alternadas cuando el suelo está frío; esta expansión y contracción crea "protuberancias" que empujan a la planta fuera del suelo, dañando a menudo las raíces; cuando la arcilla se seca, puede formar costras y grietas que inhiben la penetración y germinación de las raíces, además pueden dañar las raíces y otras partes de las plantas (Jorajuria y Draghi 2019).

2.1.2. Importancia de la compactación del suelo

El suelo es un recurso importante para el desarrollo económico y social y para el soporte físico y químico de todos los ecosistemas terrestres, donde su degradación se define como la pérdida a largo plazo de la función y la productividad del ecosistema debido a cambios que hacen que el suelo no pueda recuperarse sin ayuda (Faiguenbaum 2022).

La degradación es un problema global que afecta al medio ambiente y al desarrollo; ha aumentado del 15 % de la superficie total de tierra al 24 % en la actualidad, del cual más del 20 % es tierra utilizada para la producción agrícola; las consecuencias de este fenómeno son la reducción de la productividad agrícola, la migración, la inseguridad alimentaria, la destrucción de recursos y ecosistemas esenciales y la pérdida de biodiversidad debido a cambios de hábitat a nivel genético y de especie (Fernández 2019).

La degradación del suelo puede tener causas tanto naturales como antropogénicas, siendo estas últimas las que tienen el mayor impacto negativo; uno de los factores que provoca la degradación física del suelo es la compactación, que se considera la principal causa de degradación del suelo (Jiménez 2021).

El mismo autor detalla que la conducción con maquinaria agrícola es una de las principales causas de compactación del suelo y es acumulativa; durante la aplicación de la carga, las partículas del suelo se reorganizan, el espacio poroso se reduce, están en contacto más estrecho y la densidad aparente también aumenta; cambia la forma, tamaño y distribución de los poros, limitando la capacidad de almacenamiento del suelo, el intercambio de agua y gases y aumentando la resistencia mecánica; en las plantas, disminuyen las oportunidades de crecimiento de las raíces y la disponibilidad de nutrientes, agua y aire.

A nivel mundial se reporta que 68 millones de hectáreas de suelo han sido compactadas sólo por el uso de maquinarias agrícolas; los impactos ambientales de la compactación incluyen emisiones de gases de efecto invernadero, inundaciones crónicas de campos después de fuertes lluvias y escorrentía superficial que causa contaminación del agua superficial y arrastre del suelo que contribuye a la erosión (Inostroza y Méndez 2020).

Los mismos autores mencionan que la compactación del suelo reduce los rendimientos agrícolas, aumenta las necesidades energéticas del trabajo agrícola y cultural, la necesidad de replantar, aumenta las dosis de productos químicos agrícolas y de equipos de transporte, aumenta las necesidades de fertilizantes y el uso ineficiente de la maquinaria.

2.1.3. Compactación de los suelos arcillosos

La compactación de un suelo arcilloso se da por la pérdida de volumen que se produce en una determinada masa de suelo debido a fuerzas externas que actúan sobre él; en condiciones naturales (sin intervención humana), existen capas en el suelo con diferentes grados de compactación, lo que puede explicarse por las condiciones

que prevalecieron durante la formación y desarrollo del suelo; pero precisamente en condiciones de uso agrícola intensivo, este fenómeno se acelera y crea serios problemas para el desarrollo de las plantas cultivadas (González 2022).

La compactación de los suelos arcillosos es una de las formas más graves de degradación del suelo causada por la producción agrícola; sin embargo, a diferencia de otras formas de degradación del suelo, como la erosión o la salinización, la compactación suele ser difícil de detectar y medir y puede limitar el crecimiento y el rendimiento de los cultivos sin síntomas evidentes; si se presentan síntomas como retraso en el crecimiento de los cultivos, deficiencia de nutrientes o penetración insuficiente de agua, otras causas pueden ser las causantes (González 2022).

En general, los problemas de compactación en los suelos arcillosos son cada vez más comunes en la producción de cultivos; el tamaño y el peso de la maquinaria agrícola han aumentado dramáticamente en las últimas décadas a medida que las operaciones agrícolas se vuelven más extensas y requieren maquinaria para cubrir varias hectáreas de suelo; establecer de forma temprana diversos cultivos para maximizar el rendimiento puede aumentar la posibilidad de que partes del campo tratado estén demasiado húmedas; además, las operaciones agrícolas que cubren áreas y tramos más grandes pueden estar sujetas a cargas operativas más altas en condiciones de humedad excesiva, lo que exacerba los problemas de compactación (Ramírez 2020).

El mismo autor expresa que cierto grado de compactación de los suelos arcillosos es una consecuencia inevitable de la producción agrícola moderna, ya que la maquinaria debe moverse por el campo para plantar, cultivar y cosechar; los sistemas agrícolas modernos no pueden evitar por completo la compactación del suelo y deben gestionarse y minimizarse tanto como sea posible.

2.1.3.1. Condiciones físicas de compactación de un suelo arcilloso

A medida que disminuye el tamaño de los poros entre las partículas y disminuye la porosidad general del suelo, las raíces deben usar energía adicional para crecer y

penetrar más profundamente; esto significa que requerirán una mayor proporción de los productos de la fotosíntesis, lo que perjudica el crecimiento y la producción de las plantas (González *et al.* 2019).

Debido a la compactación, la densidad del suelo aumenta a un nivel muy alto, lo que no permite que el sistema de raíces de la planta penetre completamente, donde el sistema radicular de la palma aceitera alcanza menos de 30 cm, ya sea por alta compactación o por presencia de huellas de grada o arado, no podrá acceder a las profundidades más profundas y a los nutrientes que allí se encuentran; por tanto, problemas físicos como los mencionados anteriormente o la compactación del perfil se traducirán en una menor absorción de elementos minerales y una peor nutrición de las plantas; además, también se reducirá la infiltración de agua, lo que tiene un efecto beneficioso sobre la saturación (Keller 2020).

El mismo autor menciona que las raíces de las plantas de palma aceitera pueden tener más de un metro de profundidad; aunque la mayoría de las raíces, así como la mayoría de los nutrientes (especialmente aquellos que se mueven muy poco, como el fósforo y el potasio) se ubican en los primeros 30 a 40 centímetros, esta capa también tiene la temperatura más favorable para la absorción; además, una buena aireación del suelo ayuda a reducir la presencia y actividad de microorganismos patógenos.

Cuando existe compactación en los suelos arcillosos el agua de riego o lluvia se infiltra más lentamente debido al menor espacio poroso; en este caso, el agua se acumula y el suelo se satura hasta cierta profundidad. Debido a que la humedad es demasiado alta y el agua ocupa los poros, las plantas no tendrán suficiente oxígeno, por lo que su capacidad para absorber nutrientes importantes como el potasio y el nitrógeno se reducirá y las hojas de las plantas presentaran deficiencias aun estando fertilizadas adecuadamente (Porrás 2019).

2.1.3.2. Síntomas de compactación en suelos arcillosos

González *et al.* (2019) expresan que los síntomas en la superficie pueden adoptar muchas formas, ya que la compactación del suelo afecta el crecimiento de las raíces. Los signos de compactación pueden incluir:

- Plantas pequeñas y atrofiadas que no crecen bien individualmente o pequeños grupos de plantas con estos síntomas rodeadas de plantas normales. La aparición de plantas en determinadas zonas del campo puede indicar compactación. Esto puede deberse a que el sistema de raíces poco profundo impide que el agua se filtre al subsuelo.
- Manchas visibles o grupos de plantas atrofiadas en el cultivo
- Plantas de menor tamaño, achaparradas y de escaso crecimiento en forma aislada o pequeños grupos de plantas con esta sintomatología rodeadas de plantas normales. El marchitamiento de las plantas en ciertas áreas de un campo puede ser señal de compactación. Esto puede deberse a que los sistemas radiculares poco profundos no permiten absorber la humedad en el subsuelo.
- Malformación en el crecimiento de las raíces, incluye raíces planas, cortas, delgadas y torcidas; las raíces que crecen en un suelo con compactación subsuperficial pueden crecer más de manera horizontal que vertical y tener un sistema radicular poco profundo.
- Crecimiento anormal de las raíces, incluidas raíces planas, cortas, delgadas y retorcidas. Las raíces que crecen en suelos compactados pueden crecer más horizontalmente que verticalmente y tener sistemas de raíces menos profundos.
- La falta de nutrientes en los cultivos puede ser otro signo de compactación; dado que las raíces son la vía a través de la cual los nutrientes del suelo llegan al cultivo, la restricción de las raíces puede reducir la absorción de nutrientes por parte de las raíces en el suelo; la deficiencia de fósforo, potasio y nitrógeno pueden ser síntomas secundarios de la compactación del suelo.

- La erosión causada por agua estancada o superficial puede ser causada por la compactación del suelo; a medida que el espacio poroso del suelo disminuye, el agua se absorbe con menor facilidad.

2.1.3.3. Factores que producen la compactación en los suelos arcillosos

Núñez *et al.* (2021) manifiestan que existen factores que provocan la compactación de los suelos arcillosos tomando como referencia lo siguiente:

- a. Las gotas de lluvia o riego que caen sobre una superficie de suelo desnuda y sin vegetación son lo suficientemente fuertes como para romper y desintegrar los agregados del suelo en la superficie; esta descomposición provoca la dispersión de partículas finas que atravesarán la superficie del suelo y llenarán los poros, provocando la formación de costras o compactación en la superficie; se trata de una capa fina y densa de unos pocos milímetros de espesor, formada debido a la reordenación de partículas; los más grandes se depositan primero, los más pequeños se depositan últimos, formando así el característico manto cerrado; esta situación se agrava después de fuertes lluvias y suelos recientemente arados, lo que provoca importantes alteraciones en la estructura y los agregados, que son los más susceptibles a la degradación por las gotas de lluvia (Sáenz 2019).
- b. El ganado que camina directamente sobre pastizales ejerce inevitablemente la presión sobre el suelo, rompiendo los agregados y afectando así a su estructura; esto afecta el estado de compactación del primer centímetro del suelo, lo que se relaciona con la pérdida de macroporosidad (Sáenz 2019).
- c. Cuando el contenido de humedad del suelo es superior al óptimo para la agricultura, la labranza favorece la compactación bajo la influencia de la maquinaria agrícola y la potencia de las ruedas de agregados; además, el tráfico húmedo durante la cosecha y la falta de rotación de cultivos provocaron la compactación de la superficie y el suelo de un gran número de campos, amenazando su productividad (Ladino 2019).

- d. La compactación del suelo también puede ocurrir debido al paso de maquinaria pesada como cosechadoras y cargadoras, especialmente en condiciones húmedas; asimismo, la formación de un lecho de arado denso que se forma debajo de la profundidad de arado del suelo proporciona una superficie lisa y crea agujeros densos debido al efecto de fricción e inclinación del arado. La presencia de agua subterránea cerca de la superficie agrava el problema de la compactación, ya que todos los trabajos se realizan con un exceso de humedad, lo que contribuye a la degradación de la estructura (Rincón 2020).

2.1.4. Principales labores culturales que causan la compactación en suelos arcillosos

2.1.4.1. Compactación del suelo arcillosos por maquinaria pesada

La intensificación de la producción y el uso cada vez mayor de maquinaria pesada determinan que el transporte de tractores y maquinaria autopropulsada sea una de las principales causas de compactación en la agricultura mecanizada moderna; cuanto más suelta y húmeda esté la arcilla, mayor será el efecto (González *et al.* 2019).

Los mismos autores mencionan que el riesgo de compactación aumenta al ser mayor la carga de los neumáticos, la banda de rodadura, la presión del aire, el número de viajes y el contenido de humedad, desarrollándose hasta el punto en que las fuerzas aplicadas superan la estabilidad mecánica del suelo.

El transporte intensivo de máquinas autopropulsadas, búfalos y zorrillos en el cultivo de palma aceitera está asociado a tareas rutinarias de cosecha, fumigación, fertilización y control sanitario; por lo tanto, la compactación es un factor determinante en el daño físico del suelo provocando un desequilibrio nutricional en las plantas y condiciones de microclimáticas que afectan su crecimiento, reducen la productividad y aumentan la vulnerabilidad al ataque de enfermedades (Coral *et al.* 2019).

2.1.4.2. Control de malezas

Ibáñez (2019) menciona que el control de malezas es una labor que se realiza dos diferentes tipos de control, con rastra agrícolas y chapeadoras accionadas con

tractor en las entrecalles del cultivo de palma aceitera, las mismas que de forma continua causan la compactación de los suelos arcillosos, donde a continuación se detalla su aplicación:

- El control mecánico de malezas mediante rastras se aplica en un solo sentido debido al elevado costo de esta operación; se debe tener cuidado de no tocar el área del follaje para evitar dañar los sistemas de raíces y follaje; en el área entre las hileras se realiza un control manual o químico, a esto se le llama carrileo; esta actividad debe evitarse durante la temporada de lluvias o cuando las condiciones no sean adecuadas para la mecanización; esta actividad se realiza cuatro veces al año (Munevar 2018).
- Control mecánico mediante chapeadora, se realiza a 7,8 metros de la calle, en una dirección y con el debido cuidado para evitar daños al sistema radicular y foliar; en zonas sin pase por la chapeadora entre hileras se realiza control manual o químico; en plantaciones a partir de los 3 años se puede combinar el deshierbe manual y mecánico con varias opciones de control, pasando la chapeadora por la entrecalle de cosecha, deshierbe manual y la posibilidad de elegir las plantas adecuadas para la propagación de insectos benéficos y las plantas útiles se cortan una o dos veces al año después de su ciclo de floración (Jeschke y Nanticha 2020).

2.1.4.3. Fertilización

La aplicación de fertilizantes en el cultivo de palma aceitera puede ser mecanizada fácilmente si se cuenta con terrenos adaptados para la entrada de tractores, lo que permite incrementar rendimientos, disminuir mano de obra y costos de producción, así como mejor aprovechamiento y distribución de los insumos (Gutiérrez *et al.* 2018).

La aplicación de fertilizantes de forma mecánica en lotes adultos se da mediante aplicadores mecánicos tipo pendular, esparciendo el producto en las calles de cosecha; posteriormente se deben incorporar los aplicadores mecánicos tipo doble disco con mayores alcances y aplicación hacia las pilas de las hojas permitiendo

observar mejores resultados, disminuir pérdidas en productos y llegar a diseños de aplicadores mecánicos tipo turbo spin (Amezquita y Chávez 2020).

2.1.4.4. Poda y corte de racimo

Los rendimientos en la poda y el corte de racimos se encuentran relacionados con la experiencia del cosechero; su mecanización comprende actividades que se aplican directamente en el cultivo de palma aceitera teniendo en cuenta que deben considerarse dos alternativas para la cosecha mecanizada, donde la primera consiste en llevar la cosechero hasta el racimo para hacer el corte, esto mediante plataformas hidráulicas y la segunda, cortar desde el suelo; el desarrollo de la máquina diseñada usa la segunda alternativa que cuenta con un motor de 31, 5 hp de potencia, mandos hidráulicos que permiten realizar la poda, corte y transporte de racimo a un contenedor con capacidad para 500 kg; se reporta un rendimiento entre 4-6 t/día, afectados por la variabilidad en altura de las palmas, condiciones del terreno y tiempo efectivo trabajado (FAO 2021).

2.1.5. Principales efectos de la compactación de suelos arcillosos en la producción de palma aceitera

Bustamante *et al.* (2021) mencionan que los efectos directos que se producen en el cultivo de palma aceitera por la compactación de suelos arcillosos es la siguiente:

- **Aireación:** El espacio poroso reducido por la compactación limita la capacidad del suelo para retener agua y oxígeno, que son esenciales para el desarrollo de las raíces de las plantas.
- **Movimiento del agua:** El suelo compactado tiene pocos poros grandes y el agua no se mueve hacia abajo, por lo que las raíces no pueden extenderse o sus pelos que absorben agua no pueden penetrar los poros más pequeños que su diámetro. Por las razones mencionadas anteriormente, el rendimiento del cultivo de palma aceitera es bajo debido a un sistema de raíces poco desarrollado.

- **Crecimiento:** Desde el inicio del cultivo, puede afectar el crecimiento de las plántulas, porque es mecánicamente difícil atravesar suelos arcillosos con una alta densidad.
- **Disponibilidad de nutrientes:** La compactación reduce la proporción de poros grandes en el suelo y aumenta el contacto entre raíces y partículas, lo que promueve una mayor absorción de nutrientes por las raíces. Sin embargo, el efecto de poros pequeños impide un desarrollo radicular extenso; por lo tanto, las raíces exploran un área menor absorbiendo menos nutrientes.

La compactación de suelos arcillosos es un factor determinante en la distribución radicular, el crecimiento de la palma aceitera y su correcto desarrollo; en la cual se ha encontrado efectos negativos en el desarrollo de la raíz cuando la resistencia a la penetración del suelo fue superior a 1,2 MPa, siendo nulo con valores a 1,6 MPa; en las zonas cercanas a la palma (1 y 3 m) se genera una mayor compactación producto de la libre exposición del suelo, la presión ejercida por la caída de los racimos y el pisoteo de los operarios en labores de campo (Valarezo *et al.* 2020).

El impedimento mecánico para la penetración de las raíces de palma aceitera depende del diámetro del poro, por lo que, si su diámetro es menor que el diámetro de la cofia radicular o el suelo no es deformable, la planta no podrá continuar con su correcto desarrollo, debido a la compresión; como resultado, se reduce el rendimiento del cultivo de palma aceitera (Arnaudo 2019).

El sistema radicular de la palma de aceite está formado por una masa de raíces que parten del bulbo y se ramifican horizontal y radialmente, que se han dividido según su posición jerárquica, longitud y diámetro en primarias, secundarias, terciarias; uno de los problemas de carácter físico que se observa con mayor frecuencia en los suelos de las plantaciones es la compactación en los suelos arcillosos (Reyes y Rodríguez 2018).

El sistema radicular de la palma aceitera está formado por una gran cantidad de raíces que crecen horizontal y radialmente desde el bulbo y las ramas; según la

posición, longitud y diámetro de las capas, se divide en niveles primario, secundario y terciario; uno de los problemas de carácter físico que se observa con mayor frecuencia es la compactación de los suelos arcillosos, donde se ha evidenciado reducción en los rendimientos, debido a la escasa absorción de agua y nutrientes (Gutiérrez 2018).

En un ensayo en campo en plantaciones de palma aceitera establecidas, se evidenció en tres casos de suelos una disminución de la densidad de raíces a medida que se incrementaba la profundidad y el aumento de la distancia desde la palma; se redujo en 66 % la densidad radicular hasta los 60 cm de profundidad en el suelo 3 (suelo franco arcilloso) comparada con el suelo 1 (arcilloso); afectándose la distribución y el crecimiento de raíces desde 1 m del estípote, producto de los altos niveles de la resistencia a la penetración del suelo en esta zona, la cual alcanza hasta los 4 MPa siendo limitado el crecimiento radicular en los 3 y 4,5 m del estípote (Marcano 2020).

La compactación es uno de los principales problemas que pueden ocurrir en los suelos donde se cultiva palma aceitera, incluida la pérdida de porosidad causada por fuerzas externas que exceden la capacidad de carga del suelo; pueden ser causados por el tráfico de máquinas durante las operaciones de cultivo, como la fertilización y la cosecha, el tráfico de personas y ganado en las calles de cultivo y la caída de los racimos durante la cosecha (FAO 2021).

Las mejores plantaciones de palma aceitera se cultivan en suelos sin barreras físicas, químicas o biológicas para un buen desarrollo de las raíces; la mala aireación del suelo y la baja fertilidad provocan desequilibrios de nutrientes en las plantas que afectan gravemente la calidad y cantidad de los sistemas radiculares; varios problemas muy importantes de sanidad vegetal en el cultivo están relacionados con las condiciones de compactación del suelo que inhiben el desarrollo y mantenimiento de un sistema radicular vigoroso; el 65 % del total de raíces con diferente material genético se encuentran en los primeros 50 cm de suelo; a una distancia de 2 a 3 metros del tronco se acumulan raíces absorbentes (Rojas 2019).

2.1.6. Remediación de suelos arcillosos compactados

El diseño de equipos agrícolas modernos incorpora cambios importantes para reducir la compactación del suelo, pero algunos de estos cambios pueden exacerbar indirectamente el problema; por ejemplo, los neumáticos dobles de alto flujo, los ejes tándem y la tracción en las cuatro ruedas distribuyen el peso sobre una superficie más grande y, por lo tanto, reducen la compactación, lo que permite que la máquina funcione en suelo mojado, lo que agrava aún más el problema; por lo tanto, estos dispositivos deben usarse con la misma comprensión de la conservación del suelo que los modelos anteriores (López 2019).

2.1.6.1. Remediación mediante herramientas mecánicas

García (2022) menciona que se utilizan métodos mecánicos para romper las capas naturalmente densas o compactadas que limitan el crecimiento de las raíces y crear poros más grandes para que las raíces penetren.

2.1.6.1.1. Remediación por métodos biológicos

El método principal para restaurar la porosidad en la capa limitante de las raíces es utilizar raíces de vegetación nativa o cultivos de cobertura plantados como sustratos biológicos para penetrar el horizonte denso; introducir los restos de la planta y cortar las hojas; reciclado de nutrientes 10 TM MS/ha; las plantas adultas normales reciclan 80, 7, 105 y 11 kg de N, P, K y Mg al año en hojas cortadas; compostear los residuos industriales para evitar la lixiviación en los campos y las pérdidas de nutrientes del proceso (Herrera 2022).

2.1.6.1.2. Remediación por métodos químicos

La aplicación de yeso reduce la dispersión y promueve la floculación del suelo; la floculación es necesaria para la formación y estabilización de la estructura del suelo; el manejo adecuado de enmiendas, fertilizantes, equilibrio de nutrientes del suelo, actúan como estimuladores de raíces y penetración de raíces aumentando la aireación del suelo (Rebelo 2022).

2.2. METODOLOGÍA

El presente trabajo es una investigación documental, que se realizó por el método inductivo – deductivo, documental bibliográfico, información obtenida de los repositorios de universidades, bibliográficas de Google académico, artículos científicos, revistas indexadas y otros espacios de consulta bibliográfica.

La información obtenida fue parafraseada, resumida y analizada en la cual se obtuvo información relevante sobre los efectos de la compactación de los suelos arcillosos en el desarrollo y producción del cultivo de palma aceitera (*E. guineensis*).

2.3. RESULTADOS

En el cultivo de palma aceitera la compactación del suelo arcilloso está asociada a tareas rutinarias de cosecha, fumigación, fertilización y control sanitario; por lo tanto, la compactación es un factor determinante en el daño físico del suelo provocando un desequilibrio nutricional en las plantas y condiciones de microclimáticas que afectan su crecimiento, reducen la productividad y aumentan la vulnerabilidad al ataque de enfermedades.

Los suelos arcillosos tienen a sufrir un alto grado de compactación debido al uso intensificado de métodos estáticos en los sistemas productivos; por ende la compactación es uno de los primeros procesos de degradación, debido al colapso de las propiedades físicas del suelo como la densidad, espacio poroso y estructura, provocando que la planta disminuya su crecimiento radicular y por ende la posibilidad de obtener más nutrientes, agua y aire; además el suelo exhibe escorrentía superficial, endurecimiento y mala aireación.

La compactación de un suelo arcilloso se da por la pérdida de volumen que se produce en una determinada masa de suelo debido a fuerzas externas que actúan sobre él; en condiciones naturales (sin intervención humana), existen capas en el suelo con diferentes grados de compactación, lo que puede explicarse por las condiciones que prevalecieron durante la formación y desarrollo del suelo; pero precisamente en condiciones de uso agrícola intensivo, este fenómeno se acelera y crea serios problemas para el desarrollo de las plantas cultivadas.

Debido a la compactación, la densidad del suelo aumenta a un nivel muy alto, lo que no permite que el sistema de raíces de la planta penetre completamente, donde el sistema radicular de la palma aceitera alcanza menos de 30 cm, ya sea por alta compactación o por presencia de huellas de grada o arado, no podrá acceder a las profundidades más profundas y a los nutrientes que allí se encuentran; por tanto, problemas físicos como los mencionados anteriormente o la compactación del perfil se traducirán en una menor absorción de elementos minerales y una peor nutrición de

las plantas; además, también se reducirá la infiltración de agua, lo que tiene un efecto beneficioso sobre la saturación.

La intensificación de la producción y el uso cada vez mayor de maquinaria pesada determinan que el transporte de tractores y maquinaria autopropulsada sea una de las principales causas de compactación en la agricultura mecanizada moderna; cuanto más suelta y húmeda esté la arcilla, mayor será el efecto.

2.4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

González *et al.* (2019) mencionan que la compactación del suelo provoca la reducción del rendimiento en la producción del cultivo de palma aceitera mediante la restricción del crecimiento de las raíces y la reducción de la circulación del aire y el agua en los suelos arcillosos, donde el transporte intensivo de máquinas autopropulsadas, búfalos y zorrillos en el cultivo de palma aceitera está asociado a las labores culturales de cosecha, fumigación, fertilización y control sanitario; siendo un factor determinante en el daño físico del suelo provocando un desequilibrio nutricional en las plantas y condiciones de microclimáticas que afectan su crecimiento, reducen la productividad y aumentan la vulnerabilidad al ataque de enfermedades.

Además Arnaudo (2019) señala que en cultivos de palma aceitera establecidos en suelos arcillosos con problemas de compactación el agua de riego o lluvia se infiltra más lentamente debido al menor espacio poroso; el agua se acumula y el suelo se satura hasta cierta profundidad, la humedad es demasiado alta y el agua ocupa los poros, las plantas no tendrán suficiente oxígeno, por lo que su capacidad para absorber nutrientes importantes como el potasio y el nitrógeno se reducirá y las hojas de las plantas presentaran deficiencias aun estando fertilizadas adecuadamente; teniendo en cuenta que el impedimento mecánico para la penetración de las raíces de palma aceitera depende del diámetro del poro, por lo que, si su diámetro es menor que el diámetro de la cofia radicular o el suelo no es deformable, la planta no podrá continuar con su correcto desarrollo, debido a la compresión; como resultado, se reduce el rendimiento del cultivo de palma aceitera.

3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1. CONCLUSIONES

En referencia a los resultados obtenidos se realizan las siguientes conclusiones:

- Las principales labores culturales que causan la compactación en suelos arcillosos son la fertilización, control de malezas, la caída de los racimos durante la cosecha y la cosecha, debido al tráfico de maquinarias durante las operaciones de cultivo de palma aceitera.
- La compactación es uno de los principales problemas que pueden ocurrir en los suelos donde se cultiva palma aceitera, incluida la pérdida de porosidad causada por fuerzas externas que exceden la capacidad de carga del suelo.
- La compactación de suelos arcillosos es un factor determinante en la distribución radicular, el crecimiento de la palma aceitera y su correcto desarrollo; en la cual se ha encontrado efectos negativos en el desarrollo de la raíz cuando la resistencia a la penetración del suelo.
- Las mejores plantaciones de palma aceitera se cultivan en suelos sin barreras físicas, químicas o biológicas para un buen desarrollo de las raíces; la mala aireación del suelo y la baja fertilidad provocan desequilibrios de nutrientes en las plantas que afectan gravemente la calidad y cantidad de los sistemas radiculares

3.2. RECOMENDACIONES

Por lo anteriormente detallado se recomienda:

- Realizar programas de capacitación sobre la importancia de la compactación de suelos arcillosos en el cultivo de palma aceitera.
- Ejecutar un estudio de la calidad de los suelos en relación a la compactación, donde se evidencie las condiciones físicas de los mismos, y efecto sobre la productividad del cultivo de palma aceitera.
- Establecer en la operación de labores culturales en la palma aceitera nuevos diseños de equipos agrícolas modernos para reducir la compactación del suelo.
- Tratar de no sembrar en lo posible en suelos arcillosos.

4. REFERENCIAS Y ANEXOS

4.1. REFERENCIAS

- Amézquita, C., Chávez, O. 2020. La Compactación del Suelo y sus Efectos en la Productividad de los Suelos. San José. Costa Rica. 25 p.
- Bustamante, B., Chabla, C., Barrezueta, L. 2021. La densidad y humedad crítica como indicadores de la compactación de suelos cultivados con banano. *Revista Científica Agroecosistemas* 6:168-174.
- Coral, D., Lozano, M., Moreno, D. 2019. Prácticas culturales y de manejo de suelos. Consultado el 12 febr. 2024. Disponible en <https://sac.org.co/wp-content/uploads/2013/05/Cartilla-Suelos.pdf>
- Cadena, B., Egas, D., Ruiz, J., Mosquera, O., Benavides, D. 2021. Efecto de cinco sistemas de labranza, en la erosión de un suelo vitric haplustand, bajo cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L). *Revista Ciencias Agrícolas* 29(2): 116–128.
- Faiguenbaum, H. 2022. Un buen manejo de labranza y compactación del suelo es clave para crecer en productividad de los cultivos. Consultado el 12 febr. 2024. Disponible en <https://mundoagro.cl/un-buen-manejo-de-labranza-y-compactacion-del-suelo-es-clave-para-crecer-en-productividad-de-los-cultivos/>
- Fernández, D. 2019. Soluciones para la compactación del suelo, Degradación de la estructura del suelo. Consultado el 12 febr. 2024. Disponible en https://digital-library-drupal.s3.sa-east-1.amazonaws.com/library-content/soluciones_para_la_compactacion_del_suelo.pdf
- FAO (Organización de la Naciones Unidad para la Alimentación y la Agricultura). 2021. Soluciones para la compactación del suelo. Roma, Italia. 23 p.
- FAO (FAO (Organización de la Naciones Unidad para la Alimentación y la Agricultura). 2021. Guía de buenas prácticas para la gestión y uso sostenible de los suelos en áreas rurales. Consultado el 12 febr. 2024. Disponible en <https://www.fao.org/3/i8864es/I8864ES.pdf>

- Fernández, L. 2020. Propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos. Universidad Nacional de la Plata. Argentina. 13 p.
- Gutiérrez, G. 2020. Efecto del cultivo de palma de aceite sobre las propiedades físicas del suelo y su relación con la producción y la pudrición de cogollo. *Lámpsakos* 17: 20-28.
- Gutiérrez, N.C. 2020. Compactación de suelos en el sudoeste Chaqueño. Tesis para optar al grado de Magister. Universidad Nacional del Nordeste. Facultad de Humanidades. Postgrado en Epistemología y Metodología de la Investigación Científica. 110 p.
- Gómez, N., Villagra., Milton Solorzano, M. 2020. La labranza mecanizada y su impacto en la conservación del suelo (revisión literaria). *Tecnología en Marcha* 31(1): 170-180.
- González, K. 2022. La compactación del suelo, un fenómeno que afecta a la productividad. Consultado el 12 febr. 2024. Disponible en <https://www.tecnologiahorticola.com/la-compactacion-del-suelo-un-fenomeno-que-afecta-a-la-productividad/>
- González, O., Iglesias, J., Herrera, M. 2019. Análisis de los factores que provocan compactación del suelo agrícola. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias* 18(2): 57-63.
- González, O., Iglesias, J., Herrera, M. 2019. Compactación del suelo por tráfico de los medios de transporte durante la cosecha de caña de azúcar. *Revista Centro Azúcar* 33(2): 85-88.
- González, O., Iglesias, J., Herrera, M., López, E., Iznaga, A. 2019. Efecto de la humedad y la presión sobre el suelo en la porosidad total de un Rhodic Ferralsol. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias* 17(2): 50-54.
- Gutiérrez, F., González, A., Pérez, D., Franco, O., Morales, E., Saldívar, P., Martínez, C. 2018. Compactación Inducida por el Rodaje de Tractores Agrícolas en un Vertisol. *Rev. Terra Latinoamericana* 30 (1): 1-7.

- Gutiérrez, G. 2018. Efecto del cultivo de palma de aceite sobre las propiedades físicas del suelo y su relación con la producción y la pudrición de cogollo. *Lámpsakos* 17: 20-28.
- García, L. 2020. Características del Suelo Arcilloso. Consultado el 12 febr. 2024. Disponible en <https://www.caracteristicass.de/suelo-arcilloso/>
- Herrera, L. 2022. Características del Suelo Arcilloso. Consultado el 12 febr. 2024. Disponible en <https://www.lifeder.com/suelos-arcillosos/>
- INEC (Instituto Nacional de Estadística y Censos). 2022. ESPAC Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua 2022. Consultado 17 ener. 2024. Disponible en https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_agropecuarias/espac/espac_2022/Bolet%C3%ADn_tecnico_ESPAC_2022.pdf
- Inostroza, J., Méndez, P. 2020. Preparación del suelo. Consultado el 12 febr. 2024. Disponible en <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/7275/NR36478.pdf?sequence=8&isAllowed=y>
- Ibáñez, J. 2019. La Compactación del Suelo: Exploración del Suelo por las Raíces II. *Revista Agricultura* 4(2): 45-64.
- Jorajuria, D., Draghi, L. 2019. Sobrecompactación del suelo agrícola parte I: influencia diferencial del peso y del número de pasadas. *Revista Brasileña Ingeniería Agrícola e Ambiental* 4(3): 445–452.
- Jiménez, L. 2021. Preparación de suelos de cultivo. *Innovatione AgroFood Design*. Consultado el 12 febr. 2024. Disponible en <https://innovatione.eu/2020/01/20/preparacion-suelos-cultivo/>
- Jeschke, D., Nanticha, N. 2020. Compactación del suelo en la producción agrícola. *Revista Edafología* 12(6): 35-49.

- Keller, T. 2020. Soil compaction and soil tillage studies in agricultural soil mechanics. Tesis Doctor en Ciencias Técnicas. Suecia, Universidad Sueca de Ciencias Agrícolas. 160 p.
- López, D. 2019. Degradación del suelo causas, procesos evaluación e investigación. Universidad de los Andes. CIDIAT. 280 p.
- Ladino, L., Arias, N. 2019. Comportamiento del desarrollo radicular y vegetativo de la palma de aceite bajo diferentes condiciones de compactación en la Zona Norte. *Cenipalma* 4(2): 1-10.
- Mantuano, J. 2023. Análisis de los canales de comercialización de la palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq.) en Ecuador. Tesis Ing. Agr. Babahoyo. Ecuador. UTB. 34 p.
- Munevar, F. 2019. Problemática de los suelos cultivados con palma de aceite en Colombia. *Palmas* 19: 219-228.
- Moro, E., Venialgo, C., Gutiérrez, N., Drganc, D., Asselborn, A., Oleszczuk, J. 2019. Efecto de las labranzas y rotaciones sobre la compactación de suelos en distintos sistemas productivos de la provincia del Chaco-Republica Argentina. *Agrotecnia* 12 (2): 3-8.
- Marano, R. 2020. Compactación en suelos del centro y norte de Santa Fe. Consultado el 12 febr. 2024. Disponible en https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/112248/CONICET_Digital_Nro_48fcad8a-027e-4140-b920-d491a11f522c_A.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- Munevar, F. 2019. Problemática de los suelos cultivados con palma de aceite en Colombia. *Palmas* 19: 1-11.
- Martínez, K. 2018. Evaluación de la calidad del suelo de la finca palmicultora las palmeras, cantón la Concordia. Tesis Ing. Agr. Riobamba, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. 161 p.
- Núñez, S., Campos, S., Fernández, J., Dorado, J. 2021. Compactación producida por las labores de preparación del lecho de siembra: su efecto sobre la emergencia

de malas hierbas en un cultivo de cebada. Instituto de Ciencias Agrarias 8(4): 397-403.

Porras, V. 2019. Compactación del suelo por equipos de transporte. Consultado el 12 febr. 2024. Disponible en https://www.cenicana.org/pdf_privado/documentos_no_seridados/libro_el_cultivo_cana/libro_p179-189.pdf

Pérez, H., Pérez, M. 2023. La palma aceitera (*Elaeis guineensis*) genera un impacto negativo sobre el suelo. Agronomía Mesoamericana 34(1): 503 – 511.

Ramírez, D. 2020. Impacto de la compactación del suelo agrícola. Proain tecnología agrícola. Consultado el 12 febr. 2024. Disponible en <https://proain.com/blogs/notas-tecnicas/impacto-de-la-compactacion-del-suelo-agricola#:~:text=Los%20principales%20factores%20en%20la,Pisoteo%20de%20animales>

Reyes, L., Rodríguez, A. 2018. Estudio sobre los impactos ambientales que generan el cultivo y producción de palma de aceite africana (*Elaeis Guineensis jacq.*) en el departamento del Meta. Tesis Ing. Agr. Universidad Nacional Abierta Y A Distancia – UNAD. 113 p.

Rebelo, R. 2020. Indicadores físicos e hídricos y uso del suelo en los frutales. Suelos ecuatoriales 50 (1 y 2): 40-53.

Rincón, A. 2020. Importancia de la compactación del suelo: diagnóstico y manejo. Cenipalma 8(3): 1-8.

Rojas, M. 2019. Análisis de los niveles de compactación del suelo asociado a tres labores para cultivo de la caña de azúcar. Tesis Ing. Agr. Universidad de Costa Rica, Costa Rica. 243 p.

Sáenz, L. 2019. La Compactación del Suelo en Palma y la fertilidad del suelo. GREPALMA 12(2): 1-15.

- Taboada, M., Micucci, D., Cosentino, R. 2019. Comparison of compaction induced by conventional and zero tillage in two soils of the Rolling Pampa of Argentina. *Soil Till. Res* 49: 57-63.
- Velázquez, I., Pérez, H., Sañudo, R., Ruelas, R. 2020. Impacto del cultivo de palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.) sobre las propiedades físicas y químicas del suelo en la localidad de la Alianza, Mapastepec, Chiapas. *Revista Forestal Baracoa* 32(2): 86–91.
- Venialgo, C.; Gutiérrez, N. Gutiérrez, R.; Moro, E.; Corrales, A. 2020. Acción de la labranza cero sobre la estabilidad de agregados, porosidad y densidad aparente de suelos del dorsal agrícola chaqueño. U.N.N.E. Comunicaciones Científicas y Técnicas. CD-Room
- Valarezo, L., Valarezo, C., Mancino, M. 2020. Producción agropecuaria sostenible en suelos arcillosos del piso temperado andino del sur del Ecuador. Universidad Nacional de Loja, Ecuador. 235 p.

4.2. ANEXOS



Figura 1. Suelo arcilloso



Figura 2. Compactación de suelo arcilloso



Figura 3. Uso de maquinaria agrícola en el cultivo de palma aceitera