UNIVERSIDAD AUTONOMA DEL ESTADO DE MEXICO

CENTRO UNIVERSITARIO UAEM TEMASCALTEPEC

LICENCIATURA EN INGENIERO AGRONOMO ZOOTECNISTA

EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL SUELO, EN SISTEMAS AGRÍCOLAS DE MONOCULTIVO DE MAÍZ Y ROTACIÓN DE CULTIVOS

TESIS

Que para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO ZOOTECNISTA

Presenta:

FELIPE BONFILIO JIMENEZ ALBARRAN

Asesora:

DRA. FRANCISCA AVILES NOVA

Temascaltepec, México Abril 2026

Índice

Contenido

I. INTRODUCCIÓN 3
II. REVISIÓN DE LITERATURA 5
2.1 El Suelo como Recurso Fundamental para la Producción Agrícola 5
2.2 Concepto e importancia del suelo 5
2.3 Degradación de suelos agrícolas: causas y consecuencias 8
2.4 Propiedades Físicas del Suelo y su Relación con el Manejo Agrícola 10
2.4.1 Estructura del suelo y su influencia en el desarrollo radicular 11
2.4.2 Textura del suelo 12
2.4.3 Consistencia 13
2.4.4 Color 14
2.4.5 Densidad aparente 14
2.4.6 Porosidad 14
2.5 Propiedades Químicas del Suelo 15
2.5.1 pH del suelo 15
2.5.2 Materia orgánica y su rol en la fertilidad 15
2.5.3 Conductividad eléctrica 16
2.5.4 Macronutrientes Esenciales en el Suelo Agrícola (N, P, K) 16
2.5.5 Nitrógeno 17
2.5.6 Fosforo 17
2.5.7 Potasio 18
2.6 Impacto del Monocultivo de Maíz en las Propiedades del Suelo 19
2.6.1 Degradación de la fertilidad del suelo 19
2.6.2 Erosión del suelo 20
2.6.3 Compactación del suelo 21
2.6.4 Pérdida de la biodiversidad microbiana 21
2.6.5 Acumulación de plagas y enfermedades 22
2.7 Beneficios de la Rotación de Cultivos en la Conservación del Suelo 22
2.7.1 Mejora la estructura y fertilidad del suelo 23
2.7.2 Control natural de plagas y enfermedades 24
2.7.3 Incremento de los rendimientos agrícolas 24
2.7.4 Reducción del uso de insumos agroquímicos 25

2.7.5 Aumento de la biodiversidad y resiliencia del agroecosistema 25
2.7.6 Aporte de las leguminosas (haba y chícharo) a la materia orgánica del suelo en sistemas de rotación de cultivos 25
2.8 Técnicas de Análisis Físico-Químico del Suelo Aplicadas en México 26
2.8.1 Muestreo del suelo: técnicas y consideraciones metodológicas 27
2.8.2 Normas y protocolos de análisis utilizados en México 27
2.8.3 Importancia del análisis físico-químico en la toma de decisiones agronómicas 27
2.9 Dosificación de Fertilizantes y su Relevancia en la Agricultura 28
2.9.1 Fundamentación científica de la dosificación 29
2.9.2 Técnicas de dosificación de fertilizantes 29
2.9.3 Impactos sobre las propiedades del suelo 30
III. JUSTIFICACIÓN 31
IV. HIPÓTESIS 32
V. OBJETIVOS 33
VI. MATERIALES Y MÉTODOS 34
6.1 Localización del sitio experimental 34
6.2 Materiales 35
6.2.1 Materiales de campo. 35
6.2.2 Materiales de laboratorio. 35
6.3 Métodos 35
6.3.1 Toma de muestras 36
6.3.2 Variables de medición 38
6.4 Medición de variables físicas y químicas 39
6.4.1 Propiedades químicas del suelo. 39
6.4.2 Determinación del pH del suelo 39
6.4.3 Determinación de materia orgánica y carbono orgánico 41
6.4.4. Determinación de nitratos en el suelo 44
6.4.5 Determinación de Amonio en Suelo 47
6.4.6 Determinación de Potasio en Suelo 49
6.4.7 Determinación de Fósforo en Suelo 52
6.5 Evaluación de propiedades físicas del suelo. 55
6.5.1 Determinación de la textura en el suelo 55
6.5.2 Determinación de la Densidad Aparente 58

6.5.3 Determinación del Color del Suelo 59
6.6 Diseño experimental 63
VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN. 65
7.1 Características químicas del suelo 65
7.1.1 pH 65
7.1.2 Conductividad eléctrica 67
7.1.3 Carbono orgánico 69
7.1.4 Materia orgánica 70
7.1.5 Amonio 72
7.1.6 Nitrógeno en forma de amonio NH_3-N 73
7.1.7 Amoniaco 74
7.1.8 Nitrato 75
7.1.9 Nitratos totales 77
7.1.10 Fosfato 78
7.1.11 Fósforo elemental (P) 80
7.1.12 Pentóxido de fósforo (P_2O_5) 81
7.1.13 Potasio (K) y Óxido de Potasio (K_2O) 82
7.2 Características físicas 83
7.2.1 Color del suelo 83
7.2.2 Textura del suelo 84
7.2.3 Densidad aparente del suelo 86
VIII. CONCLUSIONES 87
IX. REFERENCIAS 89
Referencias 89

Índice de ilustraciones

Ilustración 1 Suelos de México, INGI 2007 *7*
Ilustración 2 Funciones productivas y ecológicas del suelo *8*
Ilustración 3 Degradación de los suelos *10*
Ilustración 4 Propiedades físicas de suelo (perfiles de suelo) *11*
Ilustración 5 Sistema radicular de la planta *12*
Ilustración 6 Triangulo para determinar texturas *13*
Ilustración 7 Degradación de suelos en Mexico *20*

Ilustración 8 Erosión de suelos agrícolas en México 21
Ilustración 9 Acumulación de plagas en cultivos 22
Ilustración 10 Capas del suelo en sistema de rotación de cultivo 24
Ilustr ación 11 Análisis físico- químico de suelos agrícolas 28
Ilustración 12 Localización del sitio experimental 34
Ilustración 13 Toma de muestras 37
Ilustración 14 muestras etiquetadas 38
Ilustración 15 Determinación del pH del suelo mediante potenciómetro 41
Ilustración 16 Valoración de la muestra para la determinación de materia orgánica 44
Ilustración 17 Fotómetro con tubos cónicos de 50 ml 46
Ilustración 18 Cuantificación de la muestra mediante el fotómetro 47
Ilustración 19 Pesado de la muestra en bascula analítica 49
Ilustración 20 Resultado de potasio en el fotómetro multiparamétrico HANNA HI83325-01 52
Ilustración 21 Tubo cónico de 50 ml con muestra de suelo 55
Ilustración 22 Probetas con muestras de suelo para identificar textura. 58
Ilustración 23 Tablas de Munsell para determinar color del suelo 61
Ilustración 24 Determinación de color del suelo 62

Índice de tablas

Tabla 1. pH promedio del suelo en función del sistema de manejo y la profundidad de muestreo 65
Tabla 2. Conductividad eléctrica del suelo ($\mu S\ cm^{-1}$) en función de la parcela y la profundidad de muestreo 67
Tabla 3. Carbono orgánico del suelo (%) en función de la parcela y la profundidad de muestreo 69
Tabla 4. Carbono orgánico del suelo (%) en función de la parcela y la profundidad de muestreo 71
Tabla 5. Amonio del suelo ($mg\ kg^{-1}$) en función de la parcela y la profundidad de muestreo 72
Tabla 6. Nitrógeno en forma de amonio (NH_4^+) del suelo ($mg\ kg^{-1}$) en función de la parcela y la profundidad de muestreo 73
Tabla 7. Amoniaco (NH_3) del suelo ($mg\ kg^{-1}$) en función de la parcela y la profundidad de muestreo 74
Tabla 8. Amoniaco (NH_3) del suelo ($mg\ kg^{-1}$) en función de la parcela y la profundidad de muestreo 76
Tabla 9. Nitratos totales (NO_3^-) del suelo ($mg\ kg^{-1}$) en función de la parcela y la profundidad de muestreo 77
Tabla 10. Fosfato (PO_4^{3-}) del suelo ($mg\ kg^{-1}$) en función de la parcela y la profundidad de muestreo 79
Tabla 11. Fósforo elemental (P) del suelo ($mg\ kg^{-1}$) en función de la parcela y la profundidad de muestreo 80
Tabla 12. Pentóxido de fósforo (P_2O_5) del suelo ($mg\ kg^{-1}$) en función de la parcela y la profundidad de muestreo 81
Tabla 13. Pentóxido de fósforo (P_2O_5) del suelo ($mg\ kg^{-1}$) en función de la parcela y la profundidad de muestreo 82
Tabla 14. Color del suelo en función de la parcela y la profundidad de muestreo, determinado mediante la carta de colores Munsell 84
Tabla 15. Textura del suelo en función de la parcela y la profundidad de muestreo 85
Tabla 16. Densidad aparente del suelo ($g\ cm^{-3}$) en función de la parcela y la profundidad de muestreo 87

RESUMEN

El suelo constituye un recurso natural fundamental para la producción agrícola, ya que proporciona soporte físico, agua y nutrientes esenciales para el desarrollo de las plantas. Su calidad está determinada por un conjunto de propiedades físicas y químicas que influyen directamente en la fertilidad y productividad de los sistemas agrícolas. Sin embargo, en diversas regiones de México, el uso intensivo del suelo bajo esquemas de monocultivo, particularmente de maíz, ha contribuido a su degradación, manifestándose en la disminución de materia orgánica, pérdida de nutrientes, compactación y deterioro de su estructura. Ante esta problemática, la rotación de cultivos se ha propuesto como una alternativa sostenible que favorece la conservación y mejora de las condiciones edáficas.

El presente estudio tuvo como objetivo caracterizar y comparar las propiedades físicas y químicas del suelo en dos sistemas de manejo agrícola contrastantes: monocultivo de maíz y rotación de cultivos (maíz–haba–chícharo), en la comunidad de Plutarco González, municipio de Almoloya de Alquisiras, Estado de México. La investigación se llevó a cabo en dos parcelas agrícolas de 0.5 hectáreas cada una, seleccionadas por su historial de manejo. Para la obtención de muestras, se aplicó un muestreo compuesto mediante un recorrido en zigzag, recolectando submuestras a dos profundidades (0–10 cm y 10–25 cm), con el fin de garantizar la representatividad del suelo analizado.

En laboratorio, se evaluaron diversas variables químicas como pH, materia orgánica, carbono orgánico, nitrógeno (en sus formas de nitrato y amonio), fósforo y potasio, utilizando técnicas estandarizadas como el método de Walkley-Black y análisis mediante fotometría. Asimismo, se determinaron propiedades físicas del suelo, incluyendo textura, color (mediante la tabla de Munsell) y densidad aparente, como indicadores de la estructura y condición física del suelo. Los resultados obtenidos mostraron que no se presentaron diferencias estadísticamente significativas entre los sistemas de monocultivo y rotación en la mayoría de las variables evaluadas. No obstante, se observaron ligeras tendencias favorables en el sistema de rotación de cultivos, especialmente en el contenido de materia orgánica y en algunos indicadores

asociados a la fertilidad del suelo, lo cual sugiere un impacto positivo progresivo derivado de la diversificación de cultivos y la incorporación de leguminosas.

En conclusión, aunque en el corto plazo las diferencias no fueron marcadas, la rotación de cultivos representa una estrategia viable para mejorar gradualmente la calidad del suelo, contribuyendo a la sostenibilidad de los sistemas agrícolas. Estos resultados destacan la importancia de implementar prácticas de manejo que favorezcan la conservación del recurso suelo y optimicen su productividad a largo plazo.

I. INTRODUCCIÓN

El suelo representa uno de los recursos naturales más valiosos para el desarrollo de la agricultura. Es un sistema dinámico que sostiene la vida vegetal al proporcionar soporte estructural, nutrientes esenciales, agua y un entorno biológico activo. Su calidad es determinada por una combinación de propiedades físicas, químicas y biológicas que, en conjunto, influyen directamente en la productividad agrícola y la sostenibilidad de los ecosistemas (FAO, status of the world´s soil resources, 2015).

En México, la degradación de suelos afecta aproximadamente al 45% del territorio nacional, siendo las prácticas agrícolas inadecuadas, como el monocultivo continuo y el uso excesivo de fertilizantes químicos unas de las principales causas de esta problemática (SEMARNAT, 2015) El monocultivo de maíz, por ejemplo, aunque común en muchas regiones rurales por razones económicas y culturales, tiende a agotar los nutrientes del suelo, reduce la diversidad microbiana, y favorece procesos de erosión y compactación, deteriorando progresivamente la calidad del suelo (Lopez Bellido, 2011). Ante esta situación, el análisis del suelo se convierte en una herramienta indispensable para diagnosticar su estado actual, tomar decisiones informadas sobre el manejo de cultivos, y aplicar prácticas que favorezcan su recuperación. Dicho análisis incluye la evaluación de propiedades físicas como la textura, estructura, densidad aparente, capacidad de retención de agua, y porosidad; así como propiedades químicas como el pH, contenido de materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, y concentración de nutrientes como nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) (Brady C. & Well R., 2016).

Una estrategia eficaz para contrarrestar los efectos negativos del monocultivo es la rotación de cultivos, especialmente con especies leguminosas como el chícharo y el haba. Estas plantas tienen la capacidad de fijar nitrógeno atmosférico a través de simbiosis con bacterias del género Rhizobium, lo cual mejora naturalmente la fertilidad del suelo sin necesidad de fertilización química excesiva (Altieri A., 2010). Además, la rotación diversifica la demanda de nutrientes, rompe ciclos de plagas y enfermedades, y contribuye a mantener una estructura edáfica saludable.

El presente trabajo se desarrolla en la comunidad de Plutarco González, ubicada en el municipio de Almoloya de Alquisiras, Estado de México, una zona agrícola representativa donde se practica tanto el monocultivo de maíz como sistemas de rotación. El estudio se enfoca en comparar las características físicas y químicas del suelo en parcelas manejadas bajo ambos sistemas, con el propósito de evaluar los beneficios agroecológicos de la rotación y ofrecer recomendaciones prácticas para mejorar el manejo del recurso suelo en la región. A través del análisis comparativo, se espera generar evidencia científica que permita promover prácticas agrícolas sostenibles, que no solo mejoren la productividad, sino que también preserven los recursos naturales para las generaciones futuras.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 El Suelo como Recurso Fundamental para la Producción Agrícola

El suelo es considerado como uno de los recursos naturales más importantes, de ahí la necesidad de mantener su productividad, para que a través de él y las prácticas agrícolas adecuadas se establezca un equilibrio entre la producción de alimentos y el acelerado incremento del índice demográfico (Galindo Gomez, 2012). El suelo es esencial para la vida, como lo es el aire y el agua, y cuando es utilizado de manera prudente puede ser considerado como un recurso renovable (Thompson, 2011). Así mismo es un elemento de enlace entre los factores bióticos y abióticos y se le considera un hábitat para el desarrollo de las plantas. Gracias al soporte que constituye el suelo es posible la producción de los recursos naturales, por lo cual es necesario comprender las características físicas y químicas para propiciar la productividad y el equilibrio ambiental. Los suelos retienen las sustancias minerales que las plantas necesitan para su nutrición y que se liberan por la degradación de los restos orgánicos. Un buen suelo es condición para la productividad agrícola. (Martínez Méndez, 2011)

2.2 Concepto e importancia del suelo

La palabra suelo tiene varios significados. Su significado tradicional se define como el medio natural para el crecimiento de las plantas. También se ha definido como un cuerpo natural que consiste en capas de suelo (horizontes del suelo) compuestas de materiales de minerales meteorizados, materia orgánica, aire y agua (Garrido Valero, s.f.). El suelo es el producto final de la influencia del tiempo y combinado con el clima, topografía, organismos (flora, fauna y ser humano), de materiales parentales (rocas y minerales originarios). Como resultado el suelo difiere de su material parental en su textura, estructura, consistencia, color y propiedades químicas, biológicas y físicas. El suelo es un componente esencial de la "Tierra" y "Ecosistemas". Ambos son conceptos más amplios que abarcan la vegetación, el agua y el clima en el caso de la tierra, y además abarca también las consideraciones sociales y económicas en el caso de los ecosistemas. (FAO, 2021)

La producción agropecuaria depende en gran medida de la salud del suelo, ya que los suelos sustentan la vida que se encuentra sobre ellos. La vegetación encuentra en el suelo un ambiente con nutrientes, agua y oxígeno, que es adecuado para su crecimiento. Sin embargo, la importancia del suelo para la humanidad no reside únicamente en su relación con la producción agropecuaria, sino en que además es fundamental para proveer otros servicios ecosistémicos claves que contribuyen al bienestar social y a la preservación de un medio ambiente saludable. (Piñeiro & Pinto, 2021).

En México existe una gran variedad de suelos, se puede explicarse por la interacción de diversos factores, entre los que se existe la compleja topografía originada por la actividad volcánica del Cenozoico, el gradiente altitudinal que es grande, que va de los cero a poco más de 5 600 metros sobre el nivel del mar, existen cuatro de los cinco grandes tipos de climas reconocidos por la clasificación de Köppen y la amplia diversidad paisajes y de tipos de rocas que se encuentran en el territorio (Hernandez & Garcia, 2021).

De acuerdo con el INEGI (2007), en México existen 26 de los 30 grupos de suelo reconocidos por el Sistema Internacional Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (FAO-ISRIC-ISSS, 1998); siendo los dominantes los Leptosoles (28.3% del territorio), Regosoles (13.7%), Phaeozems (11.7%), Calcisoles (10.4%), Luvisoles (9%) y Vertisoles (8.6%), que en suma cubren 81.7% del país. El 52.4% del territorio nacional está cubierto por suelos someros y poco desarrollados: Leptosoles (54.3 millones de hectáreas), Regosoles (26.3 millones de hectáreas) y Calcisoles (20 millones de ha), lo cual dificulta su aprovechamiento agrícola y aumenta su vulnerabilidad. Los suelos con mayor fertilidad (Phaeozems, Luvisoles, y Vertisoles; 22.5, 17.3 y 16.5 millones de hectáreas, respectivamente) cubren en conjunto 29.4% del país. En el resto del territorio (35 millones de hectáreas) se presenta una alta diversidad edáfica, encontrándose los otros 20 grupos distribuidos en un gran número de microrelieves, microclimas y tipos de vegetación (INEGI, 2007).

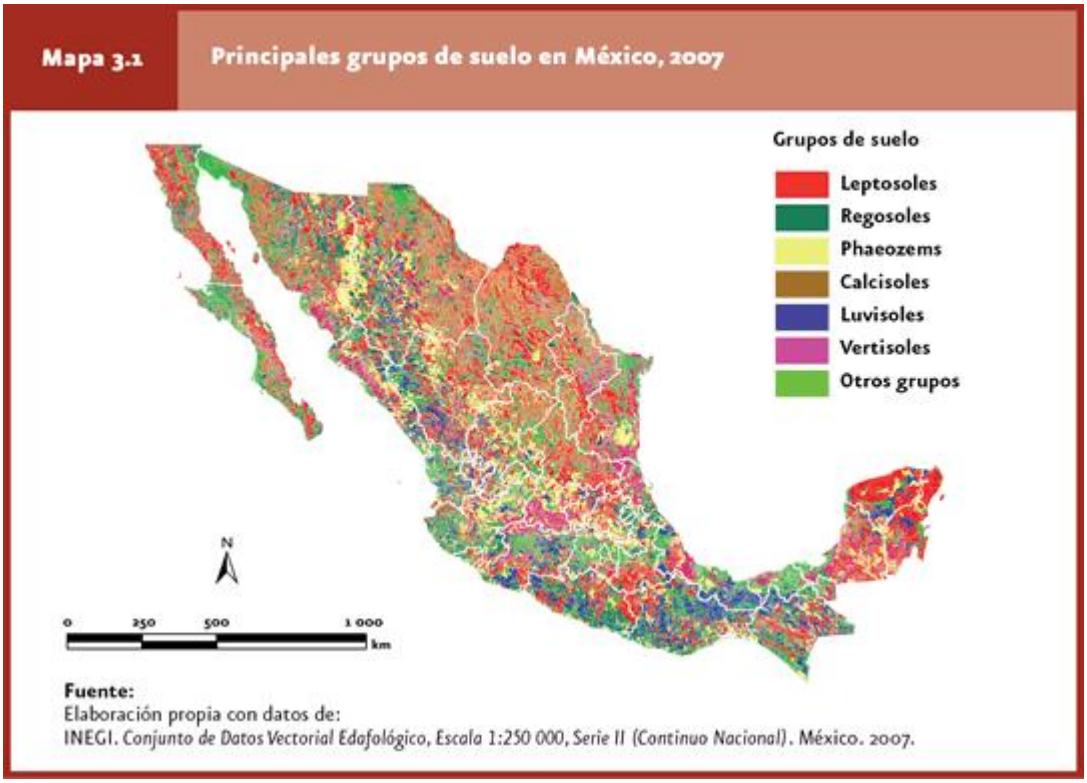


Ilustración 1 Suelos de México, INGI 2007

Funciones productivas y ecológicas del suelo

Las principales funciones productivas del suelo son:

- Proveer nutrientes esenciales (N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Zn, entre otros) para el desarrollo de los cultivos.
- Almacenar y suministrar agua para satisfacer las necesidades hídricas de las plantas.
- Servir como soporte físico para el anclaje de las raíces y el desarrollo radicular.
- Alojar y mantener una comunidad microbiana activa, fundamental para procesos como la mineralización de nutrientes, la descomposición de materia orgánica y la protección fitosanitaria natural (Alvarez Sanchez & Maldonado Torres, 2007).

Ecológicamente, el suelo participa en:

- La regulación de gases atmosféricos (captura de CO_2 y emisión de N_2O y CH_4).
- La filtración y depuración de agua, controlando la contaminación de acuíferos.

- La conservación de la biodiversidad edáfica, que incluye bacterias, hongos, protozoarios, nematodos y mesofauna edáfica (FAO, 2015).

La alteración de cualquiera de estas funciones, producto de malas prácticas agrícolas como el monocultivo intensivo o la labranza excesiva, puede traducirse en una disminución de la capacidad productiva del suelo, su resiliencia ante el cambio climático y su papel en la conservación ambiental (FAO, 2015)



Ilustración 1 Funciones productivas y ecológicas del suelo

https://agroadvance.com.br/blog-criterios-de-essencialidade-dos-nutrientes/

2.3 Degradación de suelos agrícolas: causas y consecuencias

La degradación del suelo se puede entender como la pérdida de equilibrio de sus propiedades, lo que limita su productividad. Ella tiene expresión en aspectos físicos (erosión), químicos (déficit de nutrientes, acidez, salinidad, otros) y biológicos del suelo (deficiencia de materia orgánica) (reyes, 2015). La erosión corresponde al proceso de

desgaste de la superficie terrestre, provocada por la acción de las fuerzas de la naturaleza, contribuyendo a la transformación del suelo. Por otra parte, se denomina erosión acelerada al proceso de degradación que induce el hombre en los suelos, a través de prácticas incorrectas de uso y manejo. La erosión es considerada un problema en el sector silvoagropecuario, porque el suelo es un recurso no renovable y altamente vulnerable a la acción antrópica y a las condiciones de variabilidad climática y de cambio climático global. La degradación química se puede definir como la pérdida de nutrientes (o la acumulación excesiva de algún nutriente) y el aumento de la salinidad o la acidez. La degradación biológica se ve representada por la reducción de materia orgánica (Cartez Sánchez, 2013). Las principales causas son:

- Características propias del suelo, tales como material de origen, pendiente, profundidad, textura y estructura.
- Frecuencia, intensidad y cantidad de las precipitaciones.
- Adopción de malas prácticas por parte de los agricultores. tales como cultivos en pendiente, exceso de laboreo, escasa fertilización, uso de fertilizantes acidificantes, exceso de plaguicidas, desprotección del suelo, entre otras.

Las consecuencias de esta degradación incluyen:

- Disminución de la capacidad de retención de agua, afectando la disponibilidad hídrica para los cultivos.
- Pérdida de materia orgánica, reduciendo la actividad microbiana benéfica.
- Incremento de la compactación y reducción de la porosidad, dificultando el desarrollo radicular.
- Mayor susceptibilidad a la erosión, provocando la pérdida de la capa superficial rica en nutrientes



Ilustración 2 Degradación de los suelos

https://misistemasolar.com/degradacion-del-suelo/

2.4 Propiedades Físicas del Suelo y su Relación con el Manejo Agrícola

Las propiedades físicas del suelo están relacionadas con la capacidad que tiene éste para ofrecer diferentes usos que sean de provecho para el ser humano. Para el buen uso, conservación, manejo y recuperación del recurso suelo, se requiere de conocer los fundamentos primordiales de las características físicas del suelo (Reyes Sanchez, 2025). La productividad de un suelo no sólo depende de sus contenidos nutrimentales, sino también, de las condiciones físicas del mismo, condiciones que, en ocasiones no se determinan. Hay que recordar, que el desarrollo de la parte aérea de una planta depende del desarrollo de la raíz la que, a su vez, dependerá de que el suelo tenga un buen balance de aireación y humedad. (Flores Delgadillo)



Ilustración 3 Propiedades físicas de suelo (perfiles de suelo)

https://www.portalfruticola.com/noticias/2020/01/03/propiedades-fisicas-del-suelo/

2.4.1 Estructura del suelo y su influencia en el desarrollo radicular

Desde el punto de vista morfológico, es el grado, forma o modo en que las partículas integrantes de un suelo se asocian entre sí, formando en forma natural grupos unidos sin la intervención del hombre. Los agregados son unidades secundarias o gránulos de muchas partículas de suelo enlazadas o cementadas por sustancias orgánicas, óxidos de hierro, carbonatos, arcillas o sílice. Los agregados naturales se denominan peds (granos) y varían su estabilidad en el agua; los terrones son masas coherentes de suelo, de cualquier forma, que se han quebrado por un medio artificial como la labranza. La estructura afecta la penetración del agua, el drenaje, la aireación y el desarrollo de las raíces, incidiendo así en la productividad del suelo y las facilidades de la labranza. (Mosquera, 2021)

La estructura del suelo controla la distribución, flujo y retención de agua, sustancias disueltas y gases; su perturbación conduce a procesos de degradación edáfica que se

asocian con diversas causas (compactación y cementación, entre otros), y disminuyen la productividad de los agroecosistemas (Santiago Mejia, 2016). La tasa de desarrollo del sistema radical se reduce si la planta tiene que ejercer presión para crear un mayor número de poros grandes en los que pueda crecer. La existencia de una cantidad adecuada de macroporos continuos en los que las raíces puedan penetrar libremente, es un requerimiento importante para su crecimiento (Osuna Ceja & Figueroa Sandoval, 2006).



Ilustración 4 Sistema radicular de la planta

https://bioprotectionportal.com/es/resources/soil-health-importance-and-how-to-protect/

2.4.2 Textura del suelo

La textura del suelo es un indicador de la producción relativa de arena (A), limo (L) y arcilla (R) que lo constituyen, y su nombre indica la clase textural a la que pertenece, de acuerdo con el sistema de clasificación y el triángulo de texturas se usó el triángulo

propuesto por el Departamento de la Agricultura de Estados Unidos. Es muy grande el número de combinaciones posibles de arena, limo y arcilla, solo se contienen 12 clases de texturas en el triángulo de las texturas (Ilustración 3). Los suelos de cada clase tienen aproximadamente la misma superficie especifica y otras características que son comunes. (Valdes Hernandez, 2022)

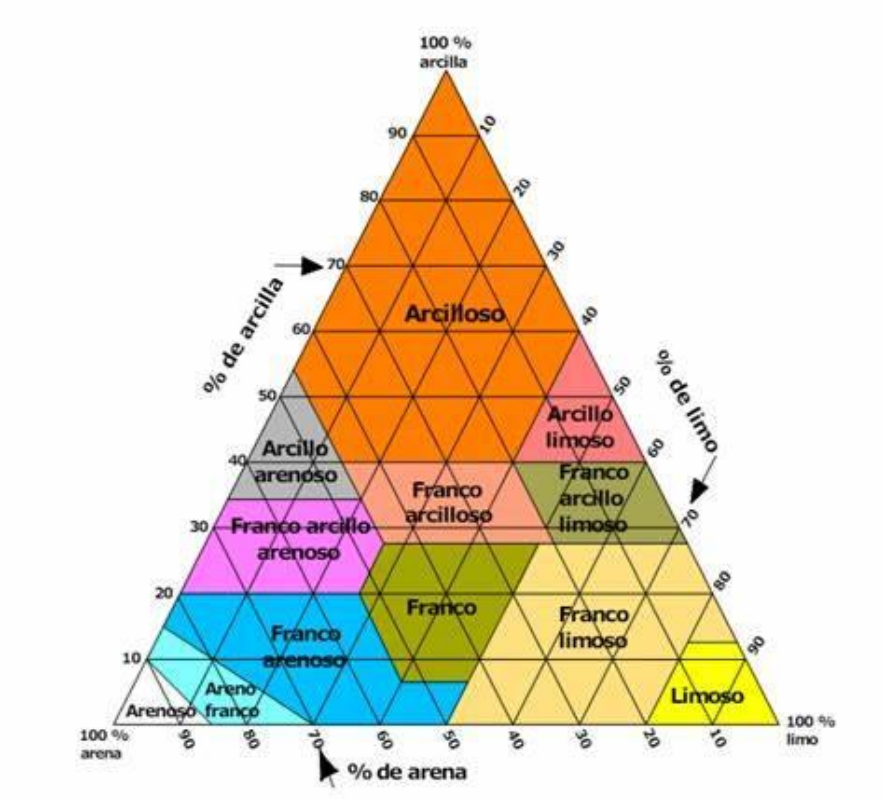


Ilustración 5 Triangulo para determinar texturas

https://plantas.facilisimo.com/como-saber-que-tipo-de-suelos-tenemos-en-el-jardin_2187889.html

2.4.3 Consistencia

La consistencia del suelo es una propiedad física que define la resistencia del suelo a ser deformado por las fuerzas que se aplican sobre él. Esta propiedad del suelo lo definen el contenido de humedad, materia orgánica del suelo y tipos de arcilla. La estabilidad estructural también es un componente importante de la resistencia del suelo (Jaramillo, 2002)

2.4.4 Color

El color del suelo es una propiedad física importante, ya que refleja características internas como contenido de materia orgánica, minerales presentes, grado de oxidación y condiciones de drenaje. Su descripción y clasificación se hace comúnmente con el uso de la tabla de colores Munsell (Cadena Iñiguez, 2017).

El sistema Munsell Soil Color Chart es el método estándar a nivel mundial —y en estudios de suelos en México— para describir el color del suelo de forma objetiva. Fue desarrollado por Albert H. Munsell y aplicado a suelos por el USDA.

2.4.5 Densidad aparente

La densidad aparente (Da) del suelo es la relación entre la masa de suelo seco (a 105 °C) y el volumen total que ocupa, incluyendo tanto sólidos como poros. Su unidad se expresa en gramos por centímetro cúbico ($g \cdot cm^{-3}$).

$$Da = \frac{\text{Masa de suelo seco (g)}}{\text{Volumen total del suelo (cm3)}}$$

Es una propiedad física clave que refleja la compactación, porosidad y facilidad de penetración de raíces, y tiene importantes implicaciones agronómicas (Ramirez Garcia, 2013).

2.4.6 Porosidad

La porosidad del suelo es una propiedad física fundamental que expresa la proporción del volumen total del suelo que no está ocupado por sólidos minerales u orgánicos, sino por espacios vacíos denominados poros. Estos poros pueden contener agua, aire o una mezcla de ambos**,** dependiendo de las condiciones de humedad y manejo del suelo. Se expresa generalmente como porcentaje (%), representando el volumen de poros respecto al volumen total del suelo. (ONU, 2018)

Matemáticamente, la porosidad (n) se calcula a partir de la relación entre la densidad aparente (Da) y la densidad real (Ds) del suelo.

2.5 Propiedades Químicas del Suelo

Las propiedades químicas del suelo se refieren a las características relacionadas con la composición y comportamiento químico de los componentes sólidos, líquidos y gaseosos del suelo. Estas propiedades son fundamentales para determinar la fertilidad del suelo, su capacidad para retener y suministrar nutrientes, así como su interacción con insumos agrícolas y contaminantes. (Ramirez Carvajal)

2.5.1 pH del suelo

El pH (potencial de hidrógeno) determina el grado de adsorción de iones (H^+) por las partículas del suelo e indica si un suelo está acido o alcalino. Es el indicador principal en la disponibilidad de nutrientes para las plantas, influyendo en la solubilidad, movilidad, disponibilidad y de otros constituyentes y contaminantes inorgánicos presentes en el suelo. El valor del pH en el suelo oscila entre 3,5 (muy ácido) a 9,5 (muy alcalino). Los suelos muy ácidos (<5,5) tienden presentar cantidades elevadas y tóxicas de aluminio y manganeso. Los suelos muy alcalinos (>8,5) tienden a dispersarse. La actividad de los organismos del suelo es inhibida en suelos muy ácidos y para los cultivos agrícolas el valor del pH ideal se encuentra en 6,5. (FAO)

En el Estado de México, se ha reportado acidificación progresiva de suelos agrícolas debido al uso continuo de fertilizantes nitrogenados en monocultivos de maíz. Por el contrario, la rotación con cultivos leguminosos puede ayudar a estabilizar el pH mediante procesos de fijación biológica de nitrógeno y aumento de la materia orgánica (Marquez Aguilar, 2025)

2.5.2 Materia orgánica y su rol en la fertilidad

Es una acumulación de materia de plantas muertas, parcialmente descompuestas y residuos de animales y plantas re-sintetizados parcialmente. La hojarasca y las raíces secas se descomponen rápidamente y sus residuos forman parte del humus. Algunas porciones permanecen en los suelos durante mucho tiempo. Los residuos de cultivos,

maleza, hierba, hojas de árboles, gusanos, bacterias, hongos y actinomicetos también forman parte de la mezcla compleja denominada MOS (valdes hernandez, 2023).

La MO es la fracción químicamente más activa del suelo, la cual almacena varios elementos esenciales para el crecimiento de las plantas, estimula la estructura del suelo, contribuye a la capacidad de intercambio catiónico (CIC), regula el pH, propicia las relaciones convenientes entre el aire y el agua en los suelos, y es un enorme depósito geoquímico de carbono-C (7). La materia orgánica del suelo se compone principalmente de C (52% a 58%), oxígeno-O (34% a 39%), hidrógeno-H (3,3% a 4,4%) y nitrógeno-N (3,7% a 4,1%); otros elementos que se destacan son el fósforo (P) y el azufre (S) (Milena Marín, 2010).

2.5.3 Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica (CE) es la capacidad de la solución del suelo para transportar corriente eléctrica en función del contenido de sales disueltas o ionizadas en la solución (USDA, 1999). Por lo tanto, a mayor CE, mayor es la concentración de sales. Esta propiedad química del suelo permite seleccionar tipo de cultivo y variedad a establecer de acuerdo con su tolerancia a los niveles de salinidad en el suelo, el sistema de cultivo ya sea surcos o en melgas, y la intensidad y/o frecuencia del riego (ONU, 2018).

2.5.4 Macronutrientes Esenciales en el Suelo Agrícola (N, P, K)

Los macronutrientes del suelo son elementos esenciales que las plantas requieren en grandes cantidades para llevar a cabo procesos fisiológicos fundamentales como la síntesis de proteínas, la fotosíntesis, el crecimiento de tejidos y la producción de energía. Entre los macronutrientes más importantes se encuentran el nitrógeno (N), el fósforo (P) y el potasio (K), que juegan roles críticos en la nutrición vegetal. El nitrógeno es un componente esencial de aminoácidos y clorofila, el fósforo forma parte de compuestos de transferencia de energía como el ATP, y el potasio regula el balance hídrico y la activación de enzimas. La disponibilidad de estos elementos en el suelo está influenciada por factores edáficos, climáticos y por prácticas de manejo agrícola,

lo que a su vez condiciona la fertilidad del suelo y el rendimiento de los cultivos (Brady C. & Well R., 2016).

La fertilidad del suelo constituye la capacidad que posee este recurso para suministrar nutrimentos esenciales en cantidades adecuadas y en formas disponibles para las plantas, permitiendo su crecimiento y desarrollo óptimo. Esta condición no solo depende del contenido total de nutrientes, sino también de su dinámica dentro del sistema edáfico, la cual está regulada por procesos físicos, químicos y biológicos que interactúan de manera constante (Sanchez V, 2024)

2.5.5 Nitrógeno

El nitrógeno en el suelo es crucial para el crecimiento de las plantas, ya que es un componente esencial de las proteínas y otros compuestos vitales para su desarrollo. La mayor parte del nitrógeno en el suelo se encuentra en la materia orgánica, pero las plantas solo pueden absorberlo en formas inorgánicas como el nitrato (NO_3^-) y el amonio (NH_4^+).

(Hernandez & Zerega, 1999), mencionan que la escasez en el abastecimiento de nitrógeno en la planta, aunque sea ligera, tiene una notable incidencia en el desarrollo. El síntoma característico es la clorosis generalizada por la planta, comenzando por las hojas viejas, dada la gran movilidad de este elemento dentro de la misma y extendiéndose desde la punta de la hoja por el nervio central hasta abarcar toda ella. En los casos graves se marchitan y mueren. En contraste la aplicación continua de fertilizantes nitrogenados sintéticos, sin manejo adecuado, puede provocar pérdida de nitrógeno por lixiviación o volatilización, contribuyendo a la contaminación de mantos acuíferos y la acidificación del suelo (INECC, 2022).

2.5.6 Fosforo

El fósforo es un elemento fundamental para la nutrición de las plantas. Es absorbido por éstas en forma de fosfatos mono y diácidos. A diferencia del nitrógeno y del azufre, que son otros elementos que se absorben en forma aniónica, el fósforo es un elemento

poco móvil. Por su tendencia a reaccionar dando formas fosforadas no disponibles para las plantas es que debe ser considerado uno de los elementos más críticos. Aunque las plantas lo contienen en menor cantidad que el nitrógeno, potasio, y calcio, tiene como factor limitativo más importancia que el calcio y quizás más que el potasio (Sanzano, Fosforo del suelo , 2002). Es un elemento que da calidad y precocidad a las plantas, ya que adelanta la maduración, a diferencia del nitrógeno, que tiende a prolongar el crecimiento vegetativo. Cumple un rol plástico, porque se encuentra en toda la planta, y especialmente en los tejidos jóvenes y órganos de reserva. En los primeros interviene en la síntesis proteica y contribuye al desarrollo radicular. En los órganos de reserva (semillas y tubérculos) forma parte de fosfolípidos y ácidos nucleicos. También cumple un rol metabólico, ya que desempeña un papel indispensable como acumulador de energía y combustible para todas las actividades bioquímicas de las células vivientes al formar parte del adenosín trifosfato (ATP). (Sanzano, 2002)

2.5.7 Potasio

El potasio es un macronutriente absorbido por las plantas en grandes cantidades, siendo superado sólo por el N y, a veces por el Ca. Es el nutriente que menores problemas de disponibilidad presenta, ya que, en general, la provisión de este elemento en los suelos es aceptable. A diferencia del fósforo (o del azufre y por extensión del nitrógeno), el potasio está presente en la solución del suelo solamente como un catión cargado positivamente, K+. A diferencia del nitrógeno y el fósforo, el potasio no ocasiona problemas ambientales cuando sale del sistema suelo. No es tóxico y no causa eutrofización en los sistemas acuáticos. Aunque el potasio juega numerosos roles en la nutrición de plantas y animales, no está incorporado a la estructura de los compuestos orgánicos. En cambio, permanece en forma iónica en solución en la célula (K+), o actúa como un activador para las enzimas celulares. Interviene en la síntesis y acumulación de hidratos de carbono y proteínas. Las plantas exigentes en K producen grandes cantidades de azúcares (remolacha, caña de azúcar, frutales, etc.). Influye en la tolerancia al frío y en la resistencia a la sequía. Mejora la

calidad de las cosechas de granos y frutas. Además, aumenta la resistencia de las plantas a las enfermedades (Zansano, 2002).

2.6 Impacto del Monocultivo de Maíz en las Propiedades del Suelo

El monocultivo es una práctica agrícola que consiste en cultivar una única especie de planta en grandes extensiones de terreno durante una o varias temporadas consecutivas. Aunque esta técnica tiene ventajas económicas en términos de producción a gran escala, rendimiento alto y facilidad de cosecha, también tiene importantes consecuencias ambientales y ecológicas, particularmente en lo que respecta al suelo. Si bien el monocultivo puede ser una técnica eficiente desde el punto de vista económico, sus efectos en el suelo son profundos y a largo plazo. Los impactos más comunes incluyen:

2.6.1 Degradación de la fertilidad del suelo

Uno de los principales problemas del monocultivo es que agota los nutrientes del suelo. Cada planta tiene requisitos específicos de nutrientes, y cuando se cultiva una sola especie durante varios ciclos consecutivos, el suelo es constantemente explotado en busca de los mismos nutrientes. Esto puede llevar a:

- Deficiencia de nutrientes: Cuando se cultivan las mismas plantas una y otra vez, el suelo pierde nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo y potasio, los cuales son necesarios para el crecimiento saludable de las plantas. A medida que los nutrientes se agotan, la fertilidad del suelo disminuye.
- Dependencia de fertilizantes artificiales: Para contrarrestar la pérdida de nutrientes, los agricultores a menudo recurren a fertilizantes sintéticos. Sin embargo, el uso excesivo de fertilizantes puede tener efectos adversos en el suelo, como acidez y salinización, que a su vez afectan negativamente la capacidad del suelo para retener agua y nutrientes



Ilustración 6 Degradación de suelos en Mexico

https://www.meteored.mx/noticias/actualidad/ave-rara-wisconsin-dos-siglos-espatula-rosada-extincion-cambio-climatico-estados-unidos-migracion.html

2.6.2 Erosión del suelo

El monocultivo también contribuye a la erosión del suelo. Al sembrar una sola especie de planta, especialmente en grandes extensiones de terreno, se reduce la diversidad vegetal, lo que significa que las raíces de las plantas no ayudan a mantener el suelo firme. En condiciones de viento y lluvia, la tierra se puede arrastrar fácilmente, lo que provoca la pérdida de capa superficial del suelo, la que es esencial para la agricultura y la biodiversidad, el suelo puede quedar expuesto a la acción directa de los elementos, sin la cobertura natural que proporcionan otras plantas o la diversidad de raíces en un ecosistema más equilibrado.

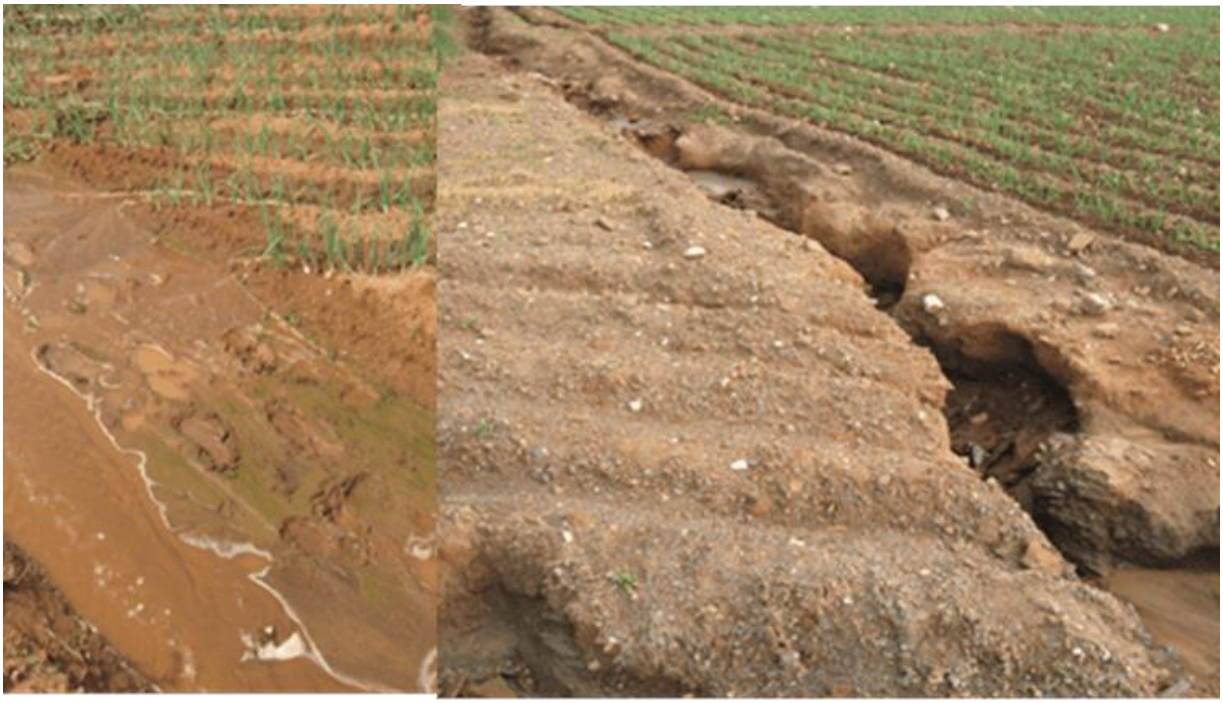


Ilustración 7 Erosión de suelos agrícolas en México

https://panoramaagrario.com/2016/03/tlaxcala-recupera-terrenos-de-cultivo-erosionado/

2.6.3 Compactación del suelo

La compactación del suelo es otro problema común en los sistemas de monocultivo. El uso repetido de maquinaria pesada para sembrar, cosechar y transportar productos puede compactar el suelo, lo que reduce su capacidad para absorber agua y aire. Esto crea un ambiente menos adecuado para el crecimiento de las raíces y aumenta la susceptibilidad del suelo a la erosión y a la pérdida de biodiversidad microbiana.

2.6.4 Pérdida de la biodiversidad microbiana

El monocultivo afecta negativamente a la microflora del suelo, es decir, los microorganismos que viven en el suelo, como bacterias, hongos y lombrices. Estos organismos desempeñan un papel crucial en la descomposición de materia orgánica, la fijación de nitrógeno y la mejora de la estructura del suelo. Cuando se cultiva una sola especie repetidamente, el ecosistema microbiano se empobrece, ya que las condiciones para la mayoría de los microorganismos no son favorables. La pérdida de biodiversidad en el suelo disminuye su capacidad para recuperarse de perturbaciones

como sequías o inundaciones, lo que hace que el sistema agrícola sea más vulnerable a las variaciones climáticas.

2.6.5 Acumulación de plagas y enfermedades

El monocultivo también crea un ambiente propicio para la proliferación de plagas y enfermedades. Al concentrar una sola especie en grandes áreas, las plantas se vuelven más vulnerables a ser atacadas por insectos y patógenos específicos. Esto lleva a un ciclo en el que los agricultores utilizan pesticidas y herbicidas de manera intensiva para controlar estos problemas. El uso excesivo de pesticidas no solo afecta a las plagas, sino que también puede dañar la fauna del suelo y contaminar los recursos hídricos cercanos, creando un círculo vicioso de deterioro ambiental. (Ricardo, 2024)



Ilustración 8 Acumulación de plagas en cultivos

https://agrosensemexico.com/control-de-plagas-en-los-cultivos-con-insecticida-biologico/

2.7 Beneficios de la Rotación de Cultivos en la Conservación del Suelo

La rotación de cultivos es una de las prácticas agrícolas más antiguas y efectivas para conservar la fertilidad del suelo, mejorar los rendimientos y reducir el uso de insumos

químicos. Aunque muchas veces subestimada en sistemas convencionales, su impacto en la agricultura sostenible y regenerativa ha sido ampliamente demostrado en estudios científicos y en la experiencia de agricultores de todo el mundo.

La rotación de cultivos consiste en alternar diferentes especies vegetales en un mismo terreno a lo largo de ciclos agrícolas sucesivos. A diferencia de la monocultura, que agota los nutrientes del suelo y favorece la aparición de plagas, la rotación busca un equilibrio biológico que permita mantener la productividad y salud del suelo a largo plazo.

En términos técnicos, se trata de un sistema de manejo agrícola que considera la diversificación temporal y funcional de los cultivos, incorporando especies de distintos grupos botánicos, necesidades nutricionales y ciclos vegetativos.

La rotación de cultivos es una de las prácticas agrícolas más efectivas y completas para mejorar la salud y productividad de un terreno. Lejos de ser una técnica limitada a la agricultura orgánica, hoy en día se reconoce como una herramienta esencial para todo tipo de sistemas agrícolas, desde la agricultura familiar hasta los modelos agroindustriales. Sus beneficios son múltiples, y abarcan no solo la fertilidad del suelo, sino también aspectos sanitarios, ecológicos y económicos. (SADER, 2024)

A continuación, se detallan sus beneficios principales:

2.7.1 Mejora la estructura y fertilidad del suelo

Uno de los efectos más notables de la rotación de cultivos es la mejora progresiva de la estructura física del suelo. Cuando se alternan cultivos con diferentes tipos de raíces se rompe la compactación, se facilita el ingreso de aire y agua, y se estimula la actividad microbiana beneficiosa.

Además, al incorporar leguminosas como frijol, alfalfa o soya, se añade una fuente natural de nitrógeno biológico al suelo gracias a la simbiosis con bacterias fijadoras (Rhizobium spp.), lo cual reduce la dependencia de fertilizantes sintéticos. Esto no solo disminuye los costos de producción, sino que también mejora la calidad biológica del sustrato, permitiendo un desarrollo más equilibrado de los cultivos siguientes.



Ilustración 9 Capas del suelo en sistema de rotación de cultivo

https://www.freepik.es/imagen-ia-premium/diagrama-rotacion-cultivos-capas-suelo-concepto-gestion-salud-suelo_163247515.htm

2.7.2 Control natural de plagas y enfermedades

En sistemas de monocultivo, las plagas encuentran un ambiente perfecto para perpetuar su ciclo de vida. Sin embargo, al rotar cultivos se interrumpe esta continuidad, dificultando la supervivencia de insectos, hongos, bacterias o nematodos especializados.

Por ejemplo, si un agricultor siembra papa por varios años consecutivos, los nematodos del suelo aumentarán rápidamente. Pero si rota con avena, cebada o leguminosas, el parásito pierde su fuente principal de alimentación y su población disminuye. Esto se traduce en menor necesidad de plaguicidas químicos, más seguridad alimentaria, y menos impacto ecológico.

2.7.3 Incremento de los rendimientos agrícolas

Uno de los beneficios más buscados y comprobados de la rotación de cultivos es el aumento sostenido del rendimiento, tanto en cantidad como en calidad. Numerosos estudios de campo, realizados en diferentes regiones y tipos de cultivo, demuestran que las parcelas rotadas obtienen mayores rendimientos que aquellas donde se repite el mismo cultivo año tras año.

Esto se debe a varios factores acumulativos: un suelo más fértil y aireado, menor presión de plagas y enfermedades, mejor aprovechamiento de los nutrientes, y una reducción del estrés hídrico. También se observa una mejora en la sanidad del cultivo, lo que se traduce en productos más uniformes, de mejor apariencia y con menos pérdidas postcosecha.

2.7.4 Reducción del uso de insumos agroquímicos

Al incorporar la rotación como parte integral del sistema de manejo, muchos productores reportan una disminución significativa en el uso de fertilizantes, herbicidas y pesticidas. Esto representa un ahorro económico considerable, pero también un paso clave hacia la sostenibilidad.

Menos insumos químicos significa menos residuos en los alimentos, menor impacto en la salud del agricultor y su familia, y una agricultura más segura para el entorno. En el caso de sistemas certificados como orgánicos o agroecológicos, la rotación es incluso un requisito técnico indispensable.

2.7.5 Aumento de la biodiversidad y resiliencia del agroecosistema

Al diversificar los cultivos que se siembran en una misma parcela, se favorece la biodiversidad funcional, tanto por encima como por debajo del suelo. Esto incluye insectos benéficos, lombrices, microorganismos, aves y microorganismos del suelo.

Ecosistemas más diversos tienden a ser más resilientes frente a perturbaciones climáticas, biológicas o económicas. En épocas de sequía, inundaciones o caída de precios, contar con un sistema rotado y diversificado puede hacer la diferencia entre mantener una campaña productiva o perderla completamente.

2.7.6 Aporte de las leguminosas (haba y chícharo) a la materia orgánica del suelo en sistemas de rotación de cultivos

Las leguminosas como el haba (Vicia faba L.) y el chícharo (Pisum sativum L.) desempeñan un papel fundamental en los sistemas de rotación de cultivos debido a su capacidad para mejorar la fertilidad del suelo. Estas especies establecen una simbiosis con bacterias del género Rhizobium, mediante la cual fijan nitrógeno

atmosférico (N_2) lo transforman en formas asimilables para las plantas, incrementando así el contenido de nitrógeno disponible en el suelo (Alvarez Aragon & Rameirez Parra, 2023).

Al finalizar el ciclo del cultivo, los residuos vegetales como raíces, tallos y hojas permanecen en el suelo o se incorporan a este, contribuyendo significativamente al aumento de la materia orgánica. Este aporte favorece la mejora de la estructura del suelo, incrementa la capacidad de retención de agua, promueve la actividad microbiana y facilita la disponibilidad de nutrientes para cultivos subsecuentes, como el maíz (Zea mays L.) (Docampo, 2022).

Asimismo, la descomposición de los residuos de leguminosas libera nitrógeno de forma gradual, lo que reduce la necesidad de fertilización química y mejora la sostenibilidad del sistema agrícola. Se ha reportado que las leguminosas pueden aportar entre 30 y 100 kg de nitrógeno por hectárea, dependiendo de la especie, manejo agronómico y condiciones del suelo (Roman & Matamoros, 2004).

2.8 Técnicas de Análisis Físico-Químico del Suelo Aplicadas en México

El análisis de suelos es una herramienta fundamental para determinar la fertilidad y potencial del suelo de alguna localidad, región, lote, o cualquier otra área geográfica. Cuando se trata de la evaluación de la fertilidad del suelo la expresión “análisis químico de suelos” es inapropiada, ya que lo que se analiza no es toda la extensión del perfil del suelo sino el material colectado en sus capas más superficiales (Lizcano & Olivera, 2017). Esta herramienta reúne una serie de parámetros que en conjunto van a dar un resultado al que se le dará una interpretación para un plan de fertilización, dependiendo del tipo de suelo, el tipo de cultivo, la edad y el sistema de producción. Para esto es importante realizar de modo correcto el muestreo, ya que de no hacerlo se pueden presentar varios errores, como la mala interpretación de los resultados obtenidos en los análisis de laboratorio. Es por ello que el muestreo correcto del suelo constituye un factor primordial para la evaluación de su fertilidad, y ante la imposibilidad de analizar todo el volumen y/o peso de la capa arable de un suelo, se utilizan muestras que van a representar todo el universo que se quiere evaluar (Mendoza & Espinoza, 2017 citado por Perez Cortez, 2020).

2.8.1 Muestreo del suelo: técnicas y consideraciones metodológicas

La recolección de muestras representativas es el primer paso en cualquier análisis del suelo. En México, se recomienda un muestreo sistemático o por zonas homogéneas dentro del terreno, considerando la profundidad efectiva del cultivo (0–20 cm para cultivos anuales como el maíz). Este muestreo asegura que las muestras sean representativas para que se puedan obtener resultados precisos y útiles en la agricultura. (SAGARPA, 2024).

El muestreo debe evitar áreas anómalas (bordes, sitios con acumulación de residuos, zonas encharcadas) y realizarse con herramientas limpias. La Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000 establece los lineamientos para este proceso, incluyendo el número mínimo de submuestras, mezcla compuesta y etiquetado correcto para su análisis.

2.8.2 Normas y protocolos de análisis utilizados en México

En México, la NOM-021-RECNAT-2000 es la norma oficial que rige los métodos para análisis físicos y químicos del suelo, estableciendo procedimientos técnicos para asegurar la comparabilidad de resultados entre laboratorios. Además, el INIFAP y algunas universidades públicas han desarrollado manuales específicos para análisis de suelos agrícolas (SEMARNAT S. d., 2002).

Los protocolos están orientados a interpretar resultados con base en umbrales críticos adaptados a los tipos de suelo más comunes del país, como los Andisoles, Luvisoles, Regosoles y Vertisoles, considerando también el tipo de cultivo y el régimen climático.

2.8.3 Importancia del análisis físico-químico en la toma de decisiones agronómicas

Una interpretación correcta de los análisis de suelo permite diseñar programas de fertilización más eficientes, detectar factores que limitan la producción, evitar procesos de degradación química como la salinización, acidificación o lixiviación de nutrientes, y fomentar un manejo agrícola sostenible.

En sistemas de monocultivo de maíz, donde suele presentarse un uso excesivo de fertilizantes nitrogenados, el análisis químico resulta clave para prevenir la contaminación de los mantos acuíferos y optimizar el aprovechamiento de los nutrientes.

En esquemas de rotación de cultivos, estos estudios facilitan la planificación de secuencias productivas que favorezcan la reposición natural de nutrientes y disminuyan la dependencia de insumos externos (Contreras & Diaz, 2018)



Ilustración 10 Análisis físico- químico de suelos agrícolas

https://masterlab.com.mx/analisis-de-suelos-en-mexico-importancia-parametros-clave-y-como-interpretar-resultados/

2.9 Dosificación de Fertilizantes y su Relevancia en la Agricultura

La dosificación de fertilizantes se refiere a la práctica de aplicar nutrientes en diferentes etapas del ciclo de cultivo, ajustando cantidades, formas y momentos según las necesidades específicas de las plantas y las condiciones del suelo. Este enfoque contrasta con la aplicación única y masiva, la cual genera pérdidas de nutrientes por lixiviación, volatilización o fijación química, reduciendo la eficiencia en el uso de fertilizantes y afectando la sustentabilidad agrícola (FAO, 2002).

El manejo integrado de nutrientes para la producción de alimentos es un nuevo enfoque que garantiza la seguridad alimentaria, la conservación y la sustentabilidad de los recursos naturales; sin embargo, es necesario la comprensión de la interacción

entre cultivos, crecimiento, microclima del suelo y su relación con las demandas de nutrientes en combinación con factores socio-económicos para llevar a cabo una agricultura intensiva, sustentable y sostenible. (Gutiérrez & Alberto, 2015).

2.9.1 Fundamentación científica de la dosificación

La dosificación precisa de nutrientes es un aspecto crucial para optimizar el rendimiento de los cultivos, y gracias a los avances en sistemas de dosificación, los agricultores pueden maximizar la eficiencia de sus plantaciones. En la agricultura moderna, la dosificación precisa de nutrientes es esencial para garantizar el crecimiento óptimo de los cultivos. Los nutrientes son fundamentales para el desarrollo de las plantas, y su dosificación adecuada puede marcar la diferencia entre una cosecha abundante y un rendimiento mediocre (Villena & Lopez, 2022).

La dosificación precisa de nutrientes no solo beneficia a los cultivos, sino que también supone ventajas para los agricultores. Algunos de los principales beneficios de estos sistemas incluyen:

– Maximización del rendimiento de los cultivos

– Reducción de costos al optimizar el uso de nutrientes

– Prevención de la sobredosificación o subdosificación

– Mejora de la salud de las plantas

– Mayor sostenibilidad ambiental al reducir el exceso de productos químicos (Morales, 2023).

2.9.2 Técnicas de dosificación de fertilizantes

La aplicación de fertilizantes puede realizarse de diversas formas, siendo la elección de la técnica más adecuada crucial para maximizar la eficiencia de los nutrientes aportados a los cultivos. Entre las técnicas más comunes se encuentran la aplicación foliar, la fertirrigación y la aplicación al suelo.

La aplicación foliar consiste en la pulverización de los fertilizantes directamente sobre las hojas de las plantas, lo que permite una rápida absorción de los nutrientes. Por otro

lado, la fertirrigación combina la aplicación de fertilizantes con el riego, lo que facilita una distribución uniforme de los nutrientes en el suelo. Finalmente, la aplicación al suelo implica la incorporación de los fertilizantes en la zona radicular de las plantas, ya sea de forma sólida o líquida.

La elección de la técnica de aplicación dependerá de factores como el tipo de cultivo, las condiciones climáticas y la disponibilidad de recursos hídricos, siendo fundamental evaluar cada situación de manera individual para garantizar la eficacia de la aplicación de los fertilizantes. (Ruralinfo, 2005)

2.9.3 Impactos sobre las propiedades del suelo

La dosificación adecuada de fertilizantes tiene efectos directos en las propiedades del suelo:

- Químicas: reduce la acidificación asociada al uso intensivo de nitrógeno, mantiene el equilibrio de cationes y mejora la disponibilidad de micronutrientes.
- Físicas: al promover un crecimiento radicular más equilibrado, mejora la estabilidad de agregados y reduce la compactación.
- Biológicas: favorece la biomasa microbiana y estimula procesos como la fijación biológica de nitrógeno y la actividad enzimática, que son indicadores de calidad del suelo (Martínez, 2022)

III. JUSTIFICACIÓN

La degradación de los suelos es una de las principales problemáticas que afecta la capacidad productiva de los sistemas agrícolas por lo cual es fundamental implementar estrategias que nos permita ayudar con la recuperación y conservación, contribuyendo a la protección del medio ambiente. El sector agrícola siendo uno de los sectores de mayor incidencia de aprovechamiento de suelo desempeña un papel fundamental en este proceso, dentro de las practicas más efectivas encontramos la rotación de cultivos; la cual nos ayuda a tener una regeneración y mantener las propiedades físicas y químicas del suelo. Dichas estrategias no solo mejoran la fertilidad del suelo, también fortalecen los ecosistemas, la rotación de cultivos presenta una mejor alternativa sostenible para optimizar la economía, ya que permite a los productores obtener hasta dos cosechas por año, de esta manera incrementando la rentabilidad, al mejorar la calidad del suelo nos da la posibilidad de ajustar de manera más precisa la dosis de fertilización ayudando a reducir costos y evitando realizar aplicaciones innecesarias, por lo tanto el llevar a cabo la realización de esta evaluación es de suma importancia ya que permite reunir información valiosa sobre las condiciones actuales del suelo en sistemas de monocultivo de maíz y rotación de cultivos. Esto contribuirá a que los productores teniendo este conocimiento puedan tomar mejores decisiones específicamente en la dosificación de fertilizantes, lo que permitirá un manejo más eficiente, económico y sostenible para el suelo agrícola.

IV. HIPÓTESIS

La rotación de cultivos de maíz-chícharo-haba, como estrategia de regeneración de suelos cultivados tradicionalmente con el monocultivo de maíz, mejora las características físicas y químicas del suelo, en la comunidad de Plutarco González, Almoloya de Alquisiras.

V. OBJETIVOS

1.1 objetivo general

Caracterizar de manera integral las propiedades físicas y químicas de dos tipos de suelos agrícolas presentes en la comunidad de Plutarco González, municipio de Almoloya de Alquisiras, Estado de México: uno destinado exclusivamente al cultivo de maíz (*Zea mays* L.) y otro manejado bajo un esquema de rotación de cultivos con maíz (*Zea mays* L.), haba (*Vicia faba* L.) y chícharo (*Pisum sativum* L.), con el fin de generar información que contribuya al manejo sostenible y a la optimización de la fertilidad del suelo.

1.2 objetivos específicos

a. Diagnosticar la fertilidad de los suelos manejados bajo monocultivo de maíz y bajo rotación de cultivos maíz–haba–chícharo, mediante la evaluación de indicadores físico-químicos clave.
b. Determinar y comparar las características físicas (textura, densidad aparente, porosidad, humedad, estructura) y químicas (pH, conductividad eléctrica, materia orgánica, macro y micronutrientes) de ambos sistemas de manejo agrícola.

VI. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1 Localización del sitio experimental

El presente estudio se llevó a cabo en dos parcelas agrícolas localizadas en la comunidad de Plutarco González, municipio de Almoloya de Alquisiras, Estado de México. La zona de estudio se encuentra aproximadamente en las coordenadas geográficas 18° 54' 03" de latitud norte y 99° 55' 37" de longitud oeste, a una altitud de 2,263 metros sobre el nivel del mar. Presenta una temperatura media anual de 22 °C, un régimen de lluvias concentrado en la temporada de verano y un clima cálido seco de acuerdo con la clasificación climática utilizada por el Servicio Meteorológico Nacional.



Ilustración 11 Localización del sitio experimental

6.2 Materiales

6.2.1 Materiales de campo.

Palas

Picos

Azadón

Overol

Botas

Metro

Registros Parcelas

Extractor de muestras

6.2.2 Materiales de laboratorio.

Bata

Muestras de suelo

Bascula.

Charolas

Pipetas

Fotómetro Hanna HI83325

Matraces.

Centrifugadora

Potenciómetro

6.3 Métodos

Las muestras de suelo se obtendrán de dos parcelas agrícolas de 0.5 hectáreas cada una, ubicadas en la comunidad de Plutarco González, municipio de Almoloya de Alquisiras, Estado de México. La primera parcela ha sido manejada, durante más de

cuatro años, bajo un esquema de rotación de cultivos que incluye maíz (*Zea mays* L.), haba (*Vicia faba* L.) y chícharo (*Pisum sativum* L.). En la temporada de lluvias se establece el cultivo de maíz y, posteriormente, tras su cosecha, se siembran haba y chícharo en el mes de diciembre, bajo condiciones de riego.

La segunda parcela, también de 0.5 hectáreas, ha sido destinada exclusivamente al monocultivo de maíz durante más de cinco años, cultivado bajo condiciones de temporal. Una vez cosechada la mazorca y retirado el rastrojo, el terreno se deja en descanso, utilizándose como pastoreo para el ganado.

La selección de estas parcelas responde a la necesidad de comparar dos sistemas contrastantes de manejo agrícola: uno con rotación de cultivos, que favorece la diversificación y el posible enriquecimiento de la materia orgánica y nutrientes; y otro bajo monocultivo prolongado, que puede inducir procesos de degradación física y química del suelo. Este contraste permitirá evaluar de manera directa el impacto del historial de uso agrícola sobre las propiedades físicas y químicas del suelo, así como establecer bases para la formulación de estrategias de manejo sostenible adaptadas a las condiciones locales.

6.3.1 Toma de muestras

En cada una de las parcelas seleccionadas se realizó un muestreo de suelo compuesto mediante el método de recorrido en zigzag, el cual permite cubrir de manera uniforme el área de estudio y reducir la influencia de la variabilidad espacial inherente a los suelos agrícolas. Este patrón de muestreo es ampliamente utilizado en estudios agronómicos debido a su eficacia para obtener muestras representativas, evitando sesgos asociados a muestreos lineales o puntuales.



Ilustración 12 Toma de muestras

En cada parcela se recolectaron cinco submuestras por cada profundidad, distribuidas equidistantemente en el recorrido. Se evitó el muestreo en bordes, depresiones, zonas con acumulación de residuos orgánicos, áreas compactadas o sitios de escurrimiento, con el objetivo de evitar muestras no representativas del manejo general del terreno.

Las muestras se extrajeron a dos profundidades:

- 0 a 10 cm: capa superficial que concentra la mayor parte de la materia orgánica, residuos de cultivos y microorganismos, además de ser la zona de interacción directa con las prácticas agrícolas.
- 10 a 25 cm: zona subsuperficial que coincide con la mayor exploración radicular de cultivos anuales y con un perfil de nutrientes móviles más estable.

Cada muestra fue almacenada en bolsas limpias y debidamente etiquetadas, preservándose en condiciones adecuadas de temperatura y manejo cuidadoso para evitar alteraciones fisicoquímicas antes de su traslado al laboratorio, garantizando así la integridad y representatividad de las muestras para su análisis.



Ilustración 13 muestras etiquetadas

6.3.2 Variables de medición

Para la caracterización integral de los suelos en estudio, se determinarán las siguientes variables:

Características químicas:

- pH: Medido con potenciómetro, para determinar la acidez o alcalinidad del suelo, factor determinante en la disponibilidad de nutrientes.

- Materia orgánica (M.O.): Cuantificada mediante la titulación según el método de Walkley-Black, método clásico para la determinación del carbono orgánico.
- Carbono total: Derivado de la cuantificación de materia orgánica, representa el contenido de carbono presente en el suelo.
- Nitratos (NO_3^-), Amonio (NH_4^+), Fosfatos (P) y Potasio (K): Determinados mediante análisis con el equipo multiparamétrico HANNA HI83325-01, que permite la medición precisa y simultánea de estos nutrientes esenciales para la nutrición vegetal.

Características físicas:

- Color: Evaluado mediante las tablas estandarizadas del sistema Munsell, que facilitan la clasificación objetiva del color del suelo.
- Textura: Determinada por el método del hidrómetro de Bouyoucos, que cuantifica la proporción de partículas de arena, limo y arcilla presentes en la muestra.
- Densidad aparente: Medida con probetas de volumen conocido, que permiten calcular la masa de suelo seco por unidad de volumen, indicador clave de compactación y porosidad.

6.4 Medición de variables físicas y químicas

6.4.1 Propiedades químicas del suelo.

Los análisis químicos de las muestras de suelo se llevaron a cabo en el Laboratorio de Suelos del Centro Universitario Temascaltepec, siguiendo estrictamente los lineamientos establecidos en la norma mexicana NMX-FF-109-SCFI-2008. Para garantizar la precisión y confiabilidad de los resultados.

6.4.2 Determinación del pH del suelo

El pH del suelo se determinó utilizando un potenciómetro modelo HANA INSTRUMENTS 8521, mediante la medición del potencial de hidrógeno en una suspensión acuosa en una relación suelo:agua de 1:5, siguiendo procedimientos estándar de análisis de suelos (NMX-FF-109-SCFI-2008).

Materiales y reactivos:

- Muestra de suelo tamizada (<2 mm)
- Agua destilada
- Soluciones reguladoras para calibración del potenciómetro
- Equipo y materiales: potenciómetro con electrodo de vidrio, balanza analítica, charolas de pesado, vasos de precipitado de 250 ml, varilla de vidrio para agitación y pipeta.

Procedimiento:

1. Se pesaron con precisión 10 g de suelo tamizado y se transfirieron a un vaso de precipitados de 250 ml.
2. Se adicionaron 50 ml de agua destilada, manteniendo la proporción 1:5 (suelo:agua).
3. La mezcla se agitó vigorosamente con una varilla de vidrio durante 1 minuto para homogeneizar la suspensión.
4. Se dejó reposar la suspensión durante 30 minutos para estabilizar el equilibrio químico entre el suelo y el agua.
5. Mientras tanto, se calibró el potenciómetro con soluciones reguladoras de pH conocidas (normalmente pH 4.0, 7.0 y 9.0), siguiendo el procedimiento recomendado por el fabricante.
6. Transcurrido el tiempo de reposo, se introdujo el electrodo de vidrio en la suspensión, moviendo ligeramente la solución para evitar burbujas.
7. Se registró el valor del pH una vez que la lectura se estabilizó, asegurando precisión en la medición.
8. Cada muestra fue analizada por duplicado para garantizar la reproducibilidad de los resultados.

Este método permite obtener una medición precisa del pH, indicador fundamental para la disponibilidad de nutrientes y la actividad biológica en el suelo.



Ilustración 14 Determinación del pH del suelo mediante potenciómetro

6.4.3 Determinación de materia orgánica y carbono orgánico

La cuantificación de la materia orgánica y del carbono orgánico en las muestras de suelo se llevó a cabo mediante el método de oxidación húmeda desarrollado por Walkley y Black (1934), siguiendo los lineamientos establecidos en la norma ICOTEC NTC 5403:2013. Este método es ampliamente reconocido por su precisión en la determinación del carbono orgánico contenido en los suelos agrícolas.

Materiales:

- Matraz Erlenmeyer de 250 ml
- Bureta

- Pipetas volumétricas (10 ml, 20 ml y 5 ml)
- Balanza analítica
- Soporte universal para bureta
- Pinzas para bureta
- Probeta de 10 ml

Reactivos:

- Dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) 1 N
- Ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4)
- Ácido fosfórico concentrado (H_3PO_4)
- Indicador de difenilamina
- Sulfato ferroso ($FeSO_4$) 1 M para la titulación

Procedimiento:

1. Se pesaron con precisión 0.5 g de suelo tamizado (<2 mm) y se colocaron en un matraz Erlenmeyer de 250 ml. (Para muestras de composta, se utilizó una cantidad de 0.3 g.) Paralelamente se preparó un blanco sin muestra de suelo para control.
2. Se adicionaron exactamente 5 ml de dicromato de potasio 1 N, agitando suavemente el matraz para asegurar un contacto uniforme con la muestra.
3. Lentamente se añadieron 10 ml de ácido sulfúrico concentrado, vertiéndolo por las paredes del matraz para evitar salpicaduras y permitir una oxidación controlada.
4. La mezcla se agitó durante 1 minuto y posteriormente se dejó reposar durante 30 minutos para completar la reacción de oxidación.
5. Se diluyó la mezcla con 100 ml de agua destilada para facilitar la posterior titulación.
6. Se añadieron 5 ml de ácido fosfórico concentrado para estabilizar la solución.

7. Se incorporaron 5 gotas de indicador de difenilamina, que permite visualizar el punto final de la titulación.
8. La solución se tituló con sulfato ferroso 1 M hasta el cambio de color característico que indica el punto final de la reacción.

Cálculo de resultados:

%C. Orgánico = ml gastados en el blanco – ml gastados en la titulación (0.39) / 0.5 Gramos de la muestra.

%M. Orgánica = % C. Orgánico X 1.724

Este método permite obtener valores confiables del carbono y materia orgánica presentes en el suelo, indicadores esenciales para evaluar la fertilidad



Ilustración 15 Valoración de la muestra para la determinación de materia orgánica

6.4.4. Determinación de nitratos en el suelo

La cuantificación de nitratos en las muestras de suelo se realizó mediante el método colorimétrico utilizando el fotómetro multiparamétrico HANNA HI83325-01. Este equipo permitió obtener los valores de nitrógeno en forma de nitrato (NO_3^--N) y nitratos totales expresados en mg/L, conforme a protocolos estandarizados para análisis de calidad del suelo.

Materiales y equipo:

- Fotómetro multiparamétrico HANNA HI83325-01

- Centrifugadora con tubos cónicos plásticos de 50 ml
- Matraz de 250 ml
- Papel filtro y embudos para filtración
- Cubetas de 10 ml para fotómetro
- Balanza analítica
- Charolas de pesado
- Espátula
- Agua destilada
- Reactivo específico para nitratos (HI93728-0)

Procedimiento:

1. Se pesaron 0.5 g de muestra de suelo seca y tamizada (<2 mm), la cual fue colocada en un tubo cónico plástico para centrifugadora de 50 ml.
2. Se añadieron 50 ml de agua destilada al tubo, logrando una suspensión homogénea.
3. Los tubos con la suspensión se sometieron a centrifugación a 1600 rpm durante 10 minutos para separar sólidos suspendidos.
4. El sobrenadante fue filtrado utilizando un embudo y papel filtro en matraces de 250 ml para obtener un extracto limpio. En caso de turbidez, se aplicó carbón activado para eliminar impurezas y materia orgánica que pudieran interferir en la lectura.
5. El fotómetro se calibró con agua destilada (blanco), llenando una cubeta con 10 ml, tapando y colocando en el compartimento del equipo; se pulsó la tecla “Zero” hasta que la pantalla mostró “-0.0-”, indicando la correcta calibración.
6. Se llenó otra cubeta con 10 ml del extracto filtrado sin reactivos, se colocó en el fotómetro y se seleccionó el método de nitratos en el equipo.
7. La cubeta fue retirada y se agregó un sobre del reactivo HI93728-0; se tapó y mezcló vigorosamente durante 10 segundos. Posteriormente, se agitó

suavemente durante 50 segundos para homogeneizar sin formar burbujas, ya que la agitación y tiempos son críticos para la precisión del análisis.

8. La cubeta se colocó nuevamente en el fotómetro, se cerró la tapa y se activó el temporizador interno (timer) que cuenta regresivamente 4 minutos y 30 segundos, periodo durante el cual se produce el desarrollo del color para la medición.
9. Al finalizar el tiempo, el equipo mostró en pantalla la concentración de nitrógeno en forma de nitrato (NO_3^--N) en mg/L (ppm).
10. Mediante la función “Chem Form” se convirtió el resultado a concentración de nitrato (NO_3^-) en mg/L.

Este procedimiento garantiza una medición precisa y confiable de los nitratos presentes en el suelo, parámetros fundamentales para evaluar el estado nutricional y la calidad del suelo en sistemas agrícolas.



Ilustración 16 Fotómetro con tubos cónicos de 50 ml



Ilustración 17 Cuantificación de la muestra mediante el fotómetro

6.4.5 Determinación de Amonio en Suelo

La cuantificación de amonio se realizó mediante el método de colorimetría, utilizando el fotómetro multiparamétrico HANNA HI83325-01, el cual permite obtener concentraciones de nitrógeno en forma de amoniaco (NH_3-N), así como de amoníaco (NH_3) y amonio (NH_4^+), expresadas en mg/L (ppm). Esta determinación es fundamental para evaluar la disponibilidad de nitrógeno inorgánico en el suelo, un indicador clave de su fertilidad y del manejo agrícola.

Materiales y equipo

- Fotómetro multiparamétrico HANNA HI83325-01
- Centrifugadora con tubos cónicos plásticos de 50 ml
- Matraz de 250 ml
- Papel filtro y embudos
- Balanza analítica
- Charolas de pesado

- Espátula
- Agua destilada
- Cubetas de vidrio de 10 ml para fotómetro
- Jeringa o pipeta graduada de 3 ml
- Reactivos para amonio: HI93733B-0 y HI93733A-0

Procedimiento

1. Pesar 0.5 g de muestra de suelo previamente seca y tamizada (< 2 mm).
2. Transferir la muestra a un tubo cónico plástico de 50 ml y añadir 50 ml de agua destilada.
3. Centrifugar durante 10 minutos a 1600 rpm para separar la fracción líquida.
4. Filtrar el sobrenadante utilizando embudo y papel filtro hacia un matraz de 250 ml. En caso de turbidez, tratar la muestra con carbón activado para eliminar impurezas y materia orgánica.
5. Calibrar el fotómetro con un blanco: llenar una cubeta de vidrio con 10 ml de agua destilada, colocar en el compartimento del equipo, cerrar la tapa y presionar la tecla Zero hasta que la pantalla indique “-0.0-”.
6. Seleccionar en el fotómetro la opción Amoniaco.
7. Con una jeringa o pipeta, tomar 1 ml del extracto de la muestra y colocarlo en una cubeta limpia; añadir reactivo HI93733B-0 hasta completar la marca de 10 ml, tapar, mezclar y colocar en el fotómetro.
8. Retirar la cubeta, agregar 4 gotas del reactivo HI93733A-0, tapar y mezclar suavemente.
9. Colocar nuevamente la cubeta en el fotómetro, cerrar la tapa y activar el temporizador (3 minutos y 30 segundos).
10. Una vez finalizado el tiempo, registrar la lectura en mg/L (ppm) de nitrógeno amoniacal (NH_3-N).

11. Utilizar la función Chem Form para convertir los valores obtenidos a concentraciones de amoníaco (NH_3) y amonio (NH_4^+) en mg/L (ppm).

Este procedimiento asegura la obtención de datos confiables sobre la disponibilidad de amonio en el suelo, lo que permite evaluar la dinámica del nitrógeno y su relación con las prácticas de manejo agrícola en los sistemas productivos estudiados.



Ilustración 18 Pesado de la muestra en bascula analítica

6.4.6 Determinación de Potasio en Suelo

La determinación de potasio se realizó mediante el método de colorimetría utilizando el fotómetro multiparamétrico HANNA HI83325-01, el cual permite cuantificar las

concentraciones de potasio (K) y óxido de potasio (K_2O) en mg/L (ppm). El potasio es un macronutriente esencial para el crecimiento vegetal, interviniendo en procesos fisiológicos como la fotosíntesis, la síntesis de proteínas y la regulación osmótica.

Materiales y equipo

- Fotómetro multiparamétrico HANNA HI83325-01
- Centrifugadora con tubos cónicos plásticos de 50 ml
- Matraz de 250 ml
- Papel filtro y embudos
- Muestra de suelo previamente seca y tamizada
- Balanza analítica
- Charolas de pesado
- Espátula
- Agua destilada
- Cubetas de vidrio de 10 ml para fotómetro
- Reactivos para potasio: HI93750A-0 y HI93750B-0

Procedimiento

1. Pesar 0.5 g de muestra de suelo seca y tamizada (< 2 mm).
2. Transferir la muestra a un tubo cónico plástico de 50 ml y añadir 50 ml de agua destilada.
3. Centrifugar durante 10 minutos a 1600 rpm.
4. Filtrar el sobrenadante utilizando embudo y papel filtro hacia un matraz de 250 ml. Si la muestra presenta turbidez, tratar con carbón activado para eliminar impurezas y materia orgánica.
5. Calibrar el fotómetro con un blanco: llenar una cubeta con 10 ml de agua destilada, tapar, colocar en el compartimento del equipo, cerrar la tapa y presionar la tecla Zero hasta que en pantalla aparezca “-0.0-”.
6. Seleccionar en el fotómetro la opción Potasio.

7. Llenar una cubeta de vidrio con 10 ml de muestra filtrada sin reaccionar; añadir 6 gotas del reactivo HI93750A-0, mezclar suavemente, tapar y colocar en el equipo.
8. Presionar la tecla Zero para poner a cero la medición.
9. Añadir a la cubeta un sobre del reactivo HI93750B-0, tapar y agitar suavemente durante 1 minuto.
10. Colocar la cubeta en el fotómetro, cerrar la tapa y activar el temporizador (2 minutos).
11. Una vez concluido el tiempo, registrar la lectura en mg/L (ppm) de potasio (K).
12. Para expresar el resultado en óxido de potasio (K_2O), utilizar la función Chem Form del equipo.

Este procedimiento permite la obtención de valores precisos de potasio disponible en el suelo, información clave para evaluar su fertilidad y la necesidad de enmiendas o fertilización potásica en los sistemas agrícolas estudiados.

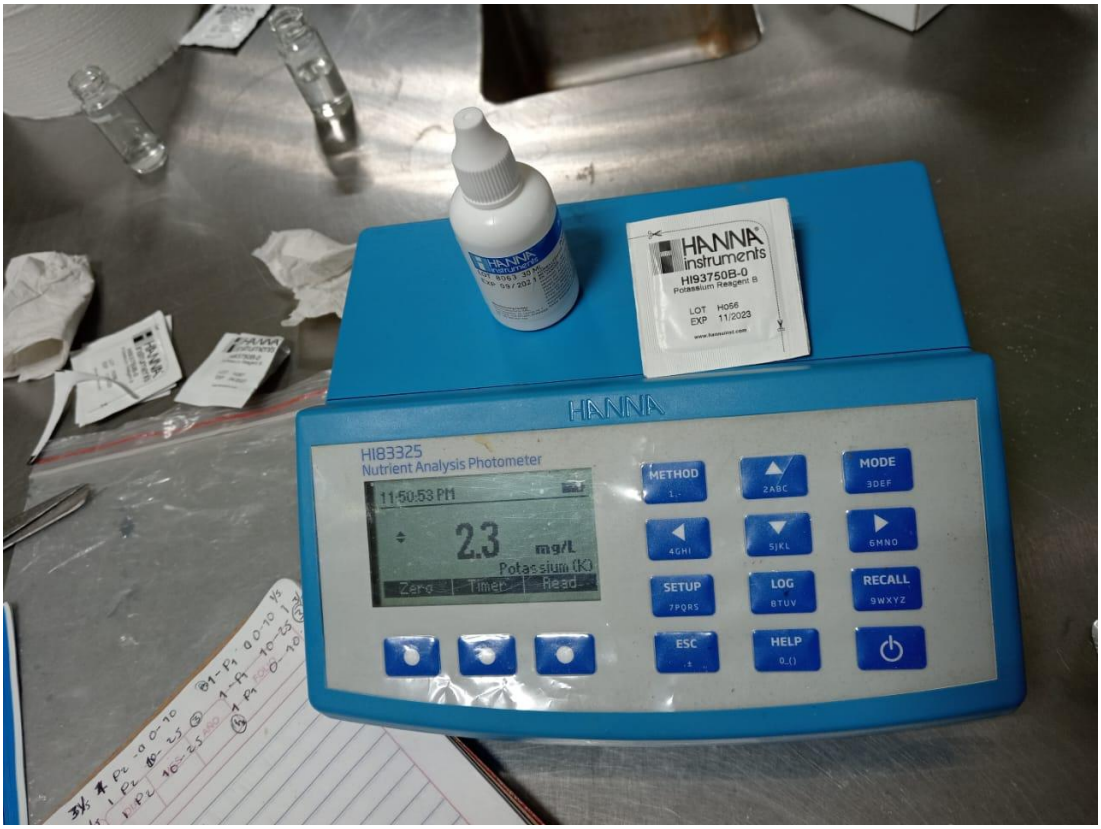


Ilustración 19 Resultado de potasio en el fotómetro multiparamétrico HANNA HI83325-01

6.4.7 Determinación de Fósforo en Suelo

El fósforo disponible en el suelo se determinó mediante el método colorimétrico utilizando el fotómetro multiparamétrico HANNA HI83325-01, el cual permite cuantificar fosfato (PO_4^{3-}), fósforo elemental (P) y pentóxido de fósforo (P_2O_5), con resultados expresados en mg/L (ppm). La determinación de este macronutriente es de gran relevancia, ya que el fósforo participa en procesos clave como la síntesis de ATP, el desarrollo radicular y la maduración de los cultivos.

Materiales y equipo

- Fotómetro multiparamétrico HANNA HI83325-01
- Centrifugadora con tubos cónicos de 50 ml
- Matraz de 250 ml
- Papel filtro y embudos
- Muestra de suelo seca y tamizada (< 2 mm)

- Balanza analítica
- Charolas de pesado
- Espátula
- Agua destilada
- Cubetas de vidrio de 10 ml para fotómetro
- Reactivos específicos: HI93717A-0 y HI937171B-0

Procedimiento

1. Pesar 0.5 g de muestra de suelo seca y tamizada (< 2 mm).
2. Transferir la muestra a un tubo cónico de plástico de 50 ml y añadir 50 ml de agua destilada.
3. Centrifugar durante 10 minutos a 1600 rpm.
4. Filtrar el sobrenadante utilizando un embudo con papel filtro en un matraz de 250 ml.
    - En caso de presentar turbidez, añadir carbón activado para eliminar impurezas y materia orgánica.
5. Calibrar el fotómetro con un blanco:
    - Llenar una cubeta con 10 ml de agua destilada, tapar y colocar en el compartimento del equipo.
    - Cerrar la tapa y presionar la tecla Zero hasta que en pantalla aparezca “-0.0-”.
6. Preparar la muestra para lectura:
    - Llenar una cubeta con 10 ml de muestra filtrada.
    - Añadir 10 gotas del reactivo HI93717A-0.
    - Incorporar un sobre del reactivo HI937171B-0.
    - Tapar y agitar suavemente hasta disolver por completo el reactivo en polvo.

7. Introducir la cubeta en el fotómetro, cerrar la tapa y activar el temporizador por 5 minutos.
8. Al finalizar el tiempo, registrar la lectura de fosfato (PO_4^{3-}) en mg/L (ppm).
9. Para expresar el resultado como fósforo elemental (P) o pentóxido de fósforo (P_2O_5), utilizar la función Chem Form del equipo.
10. Regresar a la pantalla principal de medición con las teclas de navegación.

Este procedimiento asegura una cuantificación precisa y reproducible del fósforo disponible en el suelo, aportando información fundamental para el diagnóstico de fertilidad y la planificación de estrategias de fertilización fosfatada en sistemas agrícolas.



Ilustración 20 Tubo cónico de 50 ml con muestra de suelo

6.5 Evaluación de propiedades físicas del suelo.

6.5.1 Determinación de la textura en el suelo

La textura del suelo se determinó mediante el método del hidrómetro de Bouyoucos, ampliamente utilizado para cuantificar el porcentaje relativo de arena, limo y arcilla,

fracciones que definen la clase textural. Este análisis es fundamental, ya que la textura influye directamente en propiedades como la retención de agua, la aireación, la disponibilidad de nutrientes y la susceptibilidad a la erosión.

Materiales y equipo

- Balanza analítica (precisión ± 0.01 g)
- Probeta de 1000 ml con tapón hermético
- Licuadora de alta resistencia
- Hidrómetro de Bouyoucos (-10 a 60 g/L)
- Termómetro de precisión
- Charolas de pesado
- Espátula acanalada
- Piceta para enjuague
- Muestra de suelo seca y tamizada (< 2 mm)

Reactivos y soluciones

- Metasilicato de sodio al 5% (dispersante)
- Oxalato de sodio al 5% (dispersante y defloculante)
- Alcohol amílico (antiespumante)
- Agua destilada

Procedimiento

1. Pesar 50 g de suelo seco y tamizado (< 2 mm) en la balanza analítica.
2. Colocar la muestra en el vaso de agitación y añadir 5 ml de metasilicato de sodio y 5 ml de oxalato de sodio.
3. Agregar agua hasta cubrir parcialmente la muestra (aproximadamente 200–300 ml) y agitar en licuadora durante 10 minutos para asegurar la dispersión de las partículas.

4. Transferir la suspensión a una probeta de 1000 ml, enjuagando el vaso y las paredes de la licuadora con una piceta para recuperar la totalidad de la muestra.
5. Completar el volumen en la probeta hasta la marca de 1000 ml con agua destilada.
6. Tapar la probeta y agitar vigorosamente en sentido vertical 10 veces para homogeneizar la suspensión.
7. Colocar la probeta en reposo y tomar la primera lectura con el hidrómetro y el termómetro exactamente 40 segundos después de la agitación.
8. Dejar reposar la suspensión durante 2 horas y tomar la segunda lectura con el hidrómetro y el termómetro.

Cálculo y corrección de lecturas

- Corrección por temperatura:
    - Por cada grado por encima de 20 °C, sumar 0.36 a la lectura del hidrómetro.
    - Por cada grado por debajo de 20 °C, restar 0.36.
- Cálculo de fracciones texturales:

% de limos + % arcillas= Primera lectura corrida X 2 X 100 / 50

% de arena = 100 – (% de limos + % de arcillas)

% de arcilla = segunda lectura corrida X 2 X 100 / 50

% de limos = (% de limos + % de arcillas) – (% de arcillas) La suma de % de arena + arcilla + % de limos = %100

Después de determinar los porcentajes de arcilla, arena y limo, no dirigimos con un triángulo de texturas para obtener el tipo de textura en los suelos.



Ilustración 21 Probetas con muestras de suelo para identificar textura.

6.5.2 Determinación de la Densidad Aparente

La densidad aparente (DA) es la relación entre la masa de suelo seco y el volumen que ocupa, incluyendo los poros que contiene. Este parámetro es fundamental para evaluar la compactación del suelo, la porosidad total y la capacidad de retención de agua, aspectos clave en el manejo agrícola y conservación de su calidad.

Materiales y equipo

- Probeta de 10 ml (graduada)
- Balanza analítica (precisión ± 0.01 g)
- Muestra de suelo seco y tamizado (< 2 mm)
- Espátula
- Franela limpia y seca (para apoyo y nivelado)

Procedimiento

1. Limpiar y secar la probeta para evitar residuos que alteren la medición.
2. Pesar la probeta vacía y registrar el peso como PPV (Peso de la Probeta Vacía).
3. Llenar la probeta con suelo seco hasta aproximadamente la marca de 10 ml.
4. Golpear suavemente la probeta contra la franela 10 veces para asentar el material y reducir huecos de aire.
5. Completar con más suelo hasta llegar exactamente a la marca de 10 ml.
6. Pesar la probeta con el suelo y registrar el peso como PPS (Peso de la Probeta con Suelo).
7. Calcular la densidad aparente con la fórmula:

$$DA= PPS – PPV \text{ Volumen } (10)$$

Donde:

- DA = Densidad aparente (g/cm^3)
- PPS = Peso de la probeta con suelo (g)
- PPV = Peso de la probeta vacía (g)
- V = Volumen de la probeta (cm^3), en este caso 10 cm^3

Interpretación

Valores de densidad aparente entre 1.1 y 1.4 g/cm^3 suelen indicar suelos agrícolas con buena porosidad y aireación. Valores superiores a 1.6 g/cm^3 pueden reflejar compactación, reduciendo la infiltración y el desarrollo radicular, lo que podría afectar negativamente los rendimientos.

6.5.3 Determinación del Color del Suelo

El color del suelo es una propiedad física que refleja características químicas y minerales, así como el contenido de materia orgánica y humedad. La evaluación del color permite inferir aspectos como la capacidad de drenaje, la presencia de óxidos de hierro y la fertilidad potencial del suelo.

Materiales y equipo

- Cartas estándar de colores de suelos (Munsell Soil Color Chart)
- Espátula
- Papel blanco o papel filtro
- Muestras de suelo seco y húmedo
- Fuente de luz uniforme (preferentemente luz natural indirecta o luz blanca estándar)

Procedimiento

1. Tomar una pequeña cantidad de suelo de cada microparcela y colocarla sobre un pedazo de papel limpio.
2. Evaluar el color del suelo en estado seco, asegurándose de que la muestra esté suelta y homogénea para permitir una comparación adecuada con las cartas estándar.
3. Humedecer ligeramente otra porción de la misma muestra de suelo para evaluar el color en estado húmedo. La humedad debe ser suficiente para oscurecer ligeramente el suelo sin saturarlo; el exceso de agua puede formar una película superficial que impide una lectura precisa.
4. Comparar visualmente el suelo con las cartas de color Munsell, registrando el valor de matiz, tono y valor para cada muestra.
5. Realizar la evaluación bajo una fuente de luz uniforme, ya que las variaciones de iluminación pueden alterar la percepción del color y afectar la precisión de la medición.

Consideraciones

- El color del suelo húmedo generalmente es más oscuro que el suelo seco, por lo que se deben registrar ambos estados para una interpretación completa.
- Este método proporciona una estimación cualitativa y semicuantitativa que puede correlacionarse con contenido de materia orgánica, óxidos de hierro y condiciones de drenaje.

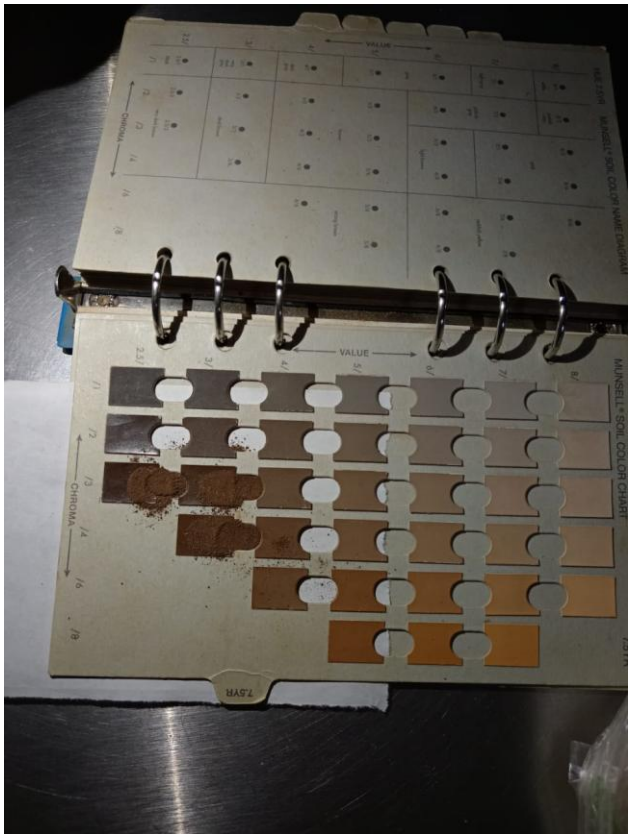


Ilustración 22 Tablas de Munsell para determinar color del suelo



Ilustración 23 Determinación de color del suelo

6.6 Diseño experimental

Para la evaluación de las propiedades físicas y químicas del suelo en los sistemas agrícolas de monocultivo de maíz y rotación de cultivos en Almoloya de Alquisiras, se empleó un diseño de bloques completos al azar (DBCA), con el fin de controlar la variabilidad del terreno y aumentar la precisión de los resultados.

Distribución de parcelas y repeticiones

- Se considerarán dos bloques experimentales:
    - Bloque 1 (B1) correspondiente a la parcela con rotación de cultivos.
    - Bloque 2 (B2) correspondiente a la parcela monocultivo
- Dentro de cada bloque se tomarán cinco repeticiones por profundidad de muestreo:
    - 0–10 cm
    - 10–25 cm

De esta forma, cada tratamiento contará con 10 observaciones por bloque, garantizando una cobertura representativa del perfil del suelo.

Análisis estadístico

Los datos obtenidos se analizarán mediante un ANOVA de dos factores, considerando los efectos de sistema agrícola (α) y profundidad del suelo (β), así como su interacción (αβ). La comparación de medias se realizará utilizando la prueba de Tukey ($p < 0.05$) para identificar diferencias significativas entre tratamientos y profundidades.

Modelo estadístico

El modelo lineal empleado será:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

Donde:

- Y_{ijk} = valor observado de la variable dependiente (propiedad física o química del suelo)
- μ = media general
- α_i = efecto del i-ésimo sistema agrícola (i = monocultivo, rotación)
- β_j = efecto de la j-ésima profundidad de muestreo (j = 0–10 cm, 10–25 cm)
- $(\alpha\beta)_{ij}$ = interacción entre sistema agrícola y profundidad
- ε_{ijk} = error experimental, asumido como normalmente distribuido con media cero y varianza constante ($\varepsilon_{ijk} \sim N(0,\sigma^2)$

VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

En este apartado se presentan y analizan los resultados obtenidos de la caracterización física y química del suelo bajo dos sistemas de manejo agrícola: rotación de cultivos y monocultivo. Se comparan propiedades físicas como textura, densidad aparente y color, así como propiedades químicas relacionadas con la fertilidad del suelo, entre ellas pH, conductividad eléctrica, contenido de materia orgánica, macronutrientes y micronutrientes. El análisis comparativo permite evaluar el efecto del sistema de manejo sobre la calidad del suelo y su potencial productivo.

7.1 Características químicas del suelo

7.1.1 pH

Los valores promedio de pH del suelo a la profundidad de 0–10 cm fueron de 5.45 en la parcela con sistema rotacional y de 6.30 en el sistema de monocultivo. En la profundidad de 10–25 cm, los valores promedio de pH fueron de 6.95 en la parcela rotacional y de 6.60 en monocultivo.

El análisis estadístico mostró que no existieron diferencias significativas en el pH del suelo entre parcelas ($p = 0.38$). Sin embargo, se presentaron diferencias significativas entre las profundidades de muestreo ($p = 0.005$), lo que indica una variación del pH en función de la profundidad del suelo (Cuadro 1). Asimismo, la interacción parcela × profundidad fue significativa ($p = 0.04$), lo que sugiere que el comportamiento del pH a distintas profundidades difiere entre los sistemas de manejo evaluados.

Tabla 1. pH promedio del suelo en función del sistema de manejo y la profundidad de muestreo

Parcela	Promedio	Profundidad	promedio
Rotacional	6.20[a]	5-10 cm	5.88[b]
Monocultivo	6.45[a]	10-25 cm	6.77[a]

Medias seguidas por literales distintas dentro de cada columna indican diferencias significativas entre parcelas o profundidades de muestreo, según la prueba de comparación de medias realizada ($p \leq 0.05$). Medias con la misma letra no difieren estadísticamente ($p > 0.05$).

Los resultados obtenidos indican que el pH del suelo no presentó diferencias significativas entre el sistema rotacional y el monocultivo, lo que sugiere que, bajo las condiciones de manejo evaluadas, el tipo de sistema productivo no ha sido suficiente para generar cambios marcados en la reacción del suelo. Este comportamiento ha sido reportado por diversos autores, quienes señalan que el pH es una propiedad relativamente estable y que sus modificaciones suelen manifestarse a largo plazo, especialmente en sistemas agrícolas con prácticas de manejo similares (Brady & Weil, 2017).

En contraste, la profundidad de muestreo sí influyó significativamente en el pH del suelo, observándose valores más bajos en la capa superficial (0–10cm) y un incremento del pH en la profundidad de 10–25 cm. Este patrón puede atribuirse principalmente a la acumulación de materia orgánica y residuos vegetales en la superficie del suelo, los cuales, durante su descomposición, generan ácidos orgánicos que contribuyen a la disminución del pH en los primeros centímetros del perfil (Havlin & Nelson, 2013)). Además, en la capa superficial es común encontrar una mayor actividad microbiana, lo que intensifica los procesos de mineralización y acidificación.

El aumento del pH en profundidades mayores puede explicarse por la menor influencia de los procesos de acidificación superficial y por la posible presencia de bases intercambiables, como calcio y magnesio, que tienden a concentrarse en capas subsuperficiales, favoreciendo una reacción del suelo menos ácida (Cruz Mamani, 2023). Asimismo, el uso continuo de fertilizantes nitrogenados, particularmente aquellos que contienen amonio, puede contribuir a la acidificación del suelo superficial, intensificando las diferencias de pH con respecto a capas más profundas (Marquez Agular & Hernandez Lopez, 2025).

La interacción significativa entre parcela y profundidad indica que la variación del pH con la profundidad no fue uniforme entre los sistemas de manejo. En el sistema rotacional, el pH presentó valores más bajos en la capa superficial, lo que puede estar relacionado con una mayor incorporación de residuos orgánicos y una dinámica biológica más activa, favorecida por la rotación de cultivos (Gonzales & R, 2007). Este tipo de manejo promueve una mayor entrada de carbono al suelo, lo que puede intensificar procesos de acidificación en la superficie.

Por otro lado, el sistema de monocultivo mostró valores de pH relativamente más altos en la superficie, lo cual puede deberse a una menor aportación de residuos vegetales y menor diversidad radicular, lo que reduce la producción de ácidos orgánicos y la actividad biológica del suelo. Estas diferencias en la dinámica del carbono y de los nutrientes explican la significancia de la interacción parcela × profundidad observada en el análisis estadístico.

En conjunto, los resultados indican que, aunque el sistema de manejo no modificó significativamente el pH promedio del suelo, la profundidad y la interacción con el tipo de manejo son factores determinantes en la distribución vertical del pH, lo cual tiene implicaciones importantes en la disponibilidad de nutrientes y en la productividad de los cultivos.

7.1.2 Conductividad eléctrica

Los valores promedio descriptivos de la conductividad eléctrica del suelo a la profundidad de 0–10 cm fueron de 706.4 µS cm^{-1} en la parcela con sistema rotacional y de 196.4 µS cm^{-1} en el monocultivo. A la profundidad de 10–25cm, los valores promedio fueron de 384.4 µS cm^{-1} en la parcela rotacional y de 115.6 µS cm^{-1} en el monocultivo.

El análisis de varianza indicó que existieron diferencias significativas entre parcelas ($p = 0.0003$). Asimismo, la profundidad de muestreo influyó significativamente en la conductividad eléctrica del suelo, presentándose valores mayores en la profundidad de 0–10 cm (451.4 µS cm^{-1}) en comparación con 10–25 cm (250.0 µS cm^{-1}) ($p = 0.0304$).

El modelo estadístico fue significativo ($p = 0.0007$). La interacción parcela × profundidad no presentó diferencia significativa ($p = 0.1742$), lo que indica que el patrón de variación de la conductividad eléctrica con la profundidad fue similar entre parcelas.

Tabla 2. Conductividad eléctrica del suelo (µS cm^{-1}) en función de la parcela y la profundidad de muestreo

Parcela	Promedio	Profundidad	Promedio

Rotacional	5.45 [a]	0-10 cm	451.4 [a]
Monocultivo	156.0 [b]	10-25 cm	250.0 [b]

Medias seguidas por literales distintas dentro de cada columna indican diferencias significativas entre parcelas o profundidades de muestreo, según la prueba de comparación de medias realizada ($p \leq 0.05$). Medias con la misma letra no difieren estadísticamente ($p > 0.05$).

Los resultados obtenidos indican que la conductividad eléctrica del suelo presentó diferencias significativas entre parcelas, lo que refleja una distinta concentración de sales solubles asociada al sistema de manejo. La mayor conductividad eléctrica observada en la parcela con sistema rotacional puede atribuirse a una mayor incorporación de residuos vegetales y una mayor actividad biológica, factores que favorecen la liberación de iones solubles durante los procesos de descomposición y mineralización de la materia orgánica (Brady & Weil, 2017).

Asimismo, la profundidad de muestreo influyó significativamente en la conductividad eléctrica, registrándose valores más elevados en la capa superficial del suelo (0–10 cm) en comparación con la profundidad de 10–25 cm. Este comportamiento es consistente con lo reportado por (Havilin & Nelson, 2014), quien señalan que las sales solubles tienden a acumularse en los primeros centímetros del suelo debido a la aplicación superficial de fertilizantes, la evaporación del agua del suelo y la limitada lixiviación de sales hacia capas más profundas.

La disminución de la conductividad eléctrica con la profundidad puede explicarse por la menor presencia de sales solubles y menor influencia de los procesos de evaporación en capas subsuperficiales, así como por el movimiento descendente del agua que favorece la redistribución de iones en el perfil del suelo. Este patrón vertical de la CE es característico de suelos agrícolas no salinos y con prácticas de manejo convencionales.

La ausencia de una interacción significativa entre parcela y profundidad indica que, aunque los valores absolutos de conductividad eléctrica difieren entre parcelas, el comportamiento de la CE con respecto a la profundidad fue similar en ambos sistemas de manejo. Esto sugiere que los procesos que controlan la acumulación y

redistribución de sales solubles en el perfil del suelo actúan de manera semejante, independientemente del sistema productivo.

En conjunto, los resultados evidencian que la conductividad eléctrica del suelo está fuertemente influenciada por el sistema de manejo y la profundidad de muestreo, siendo la acumulación superficial de sales un proceso dominante. No obstante, los valores obtenidos se mantienen dentro de rangos considerados no limitantes para el desarrollo de los cultivos, lo que indica que, bajo las condiciones evaluadas, no se presentan problemas de salinidad en el suelo

7.1.3 Carbono orgánico

Los valores promedio descriptivos de carbono orgánico del suelo a la profundidad de 0–10 cm fueron de 4.52 % en la parcela 1 y de 4.29 % en la parcela 2 (monocultivo). En la profundidad de 10–25 cm, los valores promedio fueron de 4.38 % para la parcela 1 y de 4.21 % para la parcela 2.

El análisis estadístico indicó que no se presentaron diferencias significativas en el contenido de carbono orgánico entre parcelas ($p = 0.5803$), ni entre profundidades de muestreo ($p = 0.7651$). Asimismo, la interacción parcela × profundidad no fue significativa ($p = 0.9319$), lo que indica que la distribución del carbono orgánico en el suelo fue similar entre parcelas y profundidades evaluadas.

Tabla 3. Carbono orgánico del suelo (%) en función de la parcela y la profundidad de muestreo

Parcela	Promedio	Profundidad	promedio
Rotacional	4.45 [a]	0-10 cm	4.40 [a]
Monocultivo	4.25 [a]	10-25 cm	4.30 [a]

Medias seguidas por literales distintas dentro de cada columna indican diferencias significativas entre parcelas o profundidades de muestreo, según la prueba de comparación de medias realizada ($p \leq 0.05$). Medias con la misma letra no difieren estadísticamente ($p > 0.05$).

La ausencia de diferencias significativas en el contenido de carbono orgánico entre parcelas y profundidades sugiere que ambos sistemas de manejo presentan una distribución homogénea de la materia orgánica en el perfil superficial del suelo. Este

comportamiento puede atribuirse a que los aportes de residuos vegetales y la descomposición de materia orgánica han sido similares entre parcelas, lo cual limita la diferenciación estadística del carbono orgánico (Brady & Weil, 2017).

Diversos autores señalan que el carbono orgánico suele concentrarse en los primeros centímetros del suelo debido a la acumulación de residuos y actividad microbiana en la superficie del suelo (Gomez D. & Monterroso I., 2022). Sin embargo, cuando los sistemas presentan manejos comparables o un historial similar de uso, las diferencias entre profundidades pueden no ser estadísticamente detectables (Molina Gonzalez & Mireles Acosta, 2014) En este estudio, aunque se observó una ligera disminución del carbono orgánico con la profundidad, esta variación no fue suficiente para generar diferencias significativas.

Asimismo, la falta de interacción parcela × profundidad indica que el patrón de distribución vertical del carbono orgánico fue similar en ambos sistemas, lo que concuerda con lo reportado por (Paz & Etchevers, 2002), quien mencionan que cambios en carbono orgánico requieren periodos prolongados de manejo diferenciado para reflejarse de manera significativa. Por lo tanto, los resultados sugieren que, bajo las condiciones evaluadas, el sistema de rotación no ha generado aún incrementos estadísticamente detectables en el contenido de carbono orgánico respecto al monocultivo.

7.1.4 Materia orgánica

Los valores promedio de materia orgánica del suelo en la profundidad de 0–10 cm fueron de 7.791 % en la parcela rotacional y 7.388 % en el monocultivo. Para la profundidad de 10–25 cm, los valores fueron de 7.549 % en la parcela rotacional y 7.253 % en el monocultivo. El análisis de varianza indicó que no existieron diferencias significativas en el contenido de materia orgánica entre parcelas ($p = 0.5803$), entre profundidades de muestreo ($p = 0.7651$), ni en la interacción parcela × profundidad ($p = 0.9319$). Asimismo, el modelo estadístico no fue significativo ($p = 0.9349$).

Tabla 4. Materia Orgánica del suelo (%) en función de la parcela y la profundidad de muestreo

Parcela	Promedio	Profundidad	Promedio
Rotacional	7.6708 [a]	0-10 cm	7.5901 [a]
Monocultivo	7.3211 [a]	10-25 cm	7.4018 [a]

Medias seguidas por literales distintas dentro de cada columna indican diferencias significativas entre parcelas o profundidades de muestreo, según la prueba de comparación de medias realizada ($p \leq 0.05$). Medias con la misma letra no difieren estadísticamente ($p > 0.05$).

Aunque el análisis estadístico no mostró diferencias significativas en el contenido de materia orgánica del suelo entre parcelas ni entre profundidades, los valores promedio fueron consistentemente mayores en la parcela bajo rotación en ambas profundidades evaluadas. Este comportamiento sugiere que el sistema de rotación tiende a favorecer la acumulación y conservación de la materia orgánica, aun cuando dichas diferencias no alcanzaron significancia estadística en el periodo de evaluación.

La mayor materia orgánica observada en la parcela rotacional puede atribuirse a una mayor diversidad y cantidad de residuos vegetales, tanto aéreos como radiculares, los cuales incrementan el aporte de carbono al suelo y favorecen la formación de complejos órgano-minerales más estables (Jordan Lopez, 2006). A diferencia del monocultivo, la rotación de cultivos promueve distintos patrones de crecimiento radicular, lo que mejora la distribución del carbono en el perfil superficial del suelo y estimula la actividad microbiana. (Jordan Lopez, 2006).

Asimismo, (Brady & Weil, 2017) señalan que los sistemas de rotación reducen la tasa de mineralización excesiva de la materia orgánica al disminuir la perturbación continua del suelo, favoreciendo así su conservación. En este sentido, la ausencia de diferencias significativas puede estar relacionada con el tiempo de implementación del sistema, ya que la materia orgánica es un indicador de cambio lento y suele requerir varios ciclos agrícolas para mostrar respuestas estadísticas claras.

La similitud entre profundidades (0–10 y 10–25 cm) indica que la materia orgánica se encuentra relativamente bien distribuida en los primeros centímetros del suelo, lo cual es común en sistemas agrícolas donde las prácticas de manejo favorecen la

incorporación superficial de residuos. No obstante, los valores ligeramente superiores en la capa superficial concuerdan con lo reportado por Miller y Donahue et al. (2004), quienes destacan que los efectos positivos de la rotación se manifiestan inicialmente en los estratos superiores del suelo.

En conjunto, estos resultados sugieren que, aunque estadísticamente no se detectaron diferencias, la rotación de cultivos representa un manejo más favorable desde el punto de vista edáfico, con potencial para incrementar la materia orgánica del suelo a mediano y largo plazo, lo que se traduce en mejoras en la fertilidad, estructura y sostenibilidad del sistema productivo.

7.1.5 Amonio

Los valores promedio de amonio (NH_4^+) del suelo a la profundidad de 0–10 cm fueron de 0.486 mg/kg en la parcela con sistema rotacional y de 0.386 mg/kg en el sistema de monocultivo. En la profundidad de 10–25 cm, los valores promedio de amonio fueron de 0.410 mg/kg en la parcela rotacional y de 1.034 mg/kg en monocultivo.

El análisis estadístico mostró que no existieron diferencias significativas en el contenido de amonio entre parcelas ($p = 0.27$) ni entre profundidades de muestreo ($p = 0.23$). Asimismo, la interacción parcela × profundidad no fue significativa ($p = 0.13$), lo que indica que el comportamiento del amonio es similar en ambos sistemas de manejo y a diferentes profundidades (Cuadro 5).

Tabla 5. Amonio del suelo (mg kg^{-1}) en función de la parcela y la profundidad de muestreo

Parcela	Promedio	Profundidad	Promedio
Rotacional	0.4480 [a]	0-10 cm	0.4360 [a]
Monocultivo	0.7100 [a]	10-25 cm	0.7220 [a]

Medias seguidas por literales distintas dentro de cada columna indican diferencias significativas entre parcelas o profundidades de muestreo, según la prueba de comparación de medias realizada ($p \leq 0.05$). Medias con la misma letra no difieren estadísticamente ($p > 0.05$).

Los resultados obtenidos muestran que no existieron diferencias significativas en el contenido de amonio entre parcelas ni entre profundidades, lo que indica que este

nutriente se mantiene relativamente estable bajo los sistemas de manejo evaluados. Esta estabilidad puede atribuirse a la naturaleza dinámica del amonio, su rápida transformación en el suelo y la influencia de factores ambientales como la humedad y la actividad microbiana.

Estudios previos coinciden con estos hallazgos. Por ejemplo, Brady y Weil (2017) señalan que el amonio en el suelo es altamente variable y responde rápidamente a procesos de mineralización y nitrificación, lo que dificulta detectar diferencias significativas en evaluaciones puntuales. De igual manera, Havlin et al. (2014) reportan que el nitrógeno mineral, en especial el amonio, suele presentar altas fluctuaciones incluso dentro de un mismo sistema de manejo, debido a su dinámica biológica y química.

7.1.6 Nitrógeno en forma de amonio NH_3-N

Los valores promedio de NH_3-N del suelo a la profundidad de 0–10 cm fueron de 0.558 en la parcela de monocultivo y de 0.332 en la parcela rotacional. En la profundidad de 10–25 cm, los valores promedio fueron de 0.330 en la parcela rotacional y de 1.224 en la parcela de monocultivo.

El análisis estadístico mostró que no existieron diferencias significativas entre parcelas ni entre profundidades ($p > 0.05$), y la interacción parcela × profundidad tampoco fue significativa, lo que indica que el comportamiento del NH_3-N en el suelo no difiere entre los sistemas de manejo ni con la profundidad del muestreo.

Tabla 6. Nitrógeno en forma de amonio (NH_4^+) del suelo (mg kg^{-1}) en función de la parcela y la profundidad de muestreo

Parcela	Promedio	Profundidad	Promedio
Rotacional	0.4480 [a]	0-10 cm	0.4450 [a]
Monocultivo	0.7780 [a]	10-25 cm	0.7810 [a]

Medias seguidas por literales distintas dentro de cada columna indican diferencias significativas entre parcelas o profundidades de muestreo, según la prueba de comparación de medias realizada ($p \leq 0.05$). Medias con la misma letra no difieren estadísticamente ($p > 0.05$).

Los contenidos de NH_3-N en el suelo no mostraron diferencias significativas entre parcelas ni profundidades ($p > 0.05$), indicando que la distribución del NH_3-N fue similar en el sistema rotacional y en el monocultivo. Sin embargo, la parcela con rotación mostró valores más uniformes entre profundidades, mientras que el monocultivo presentó mayor variación.

Mallarino y Rueber (2002) reportaron que las rotaciones que incluyen cultivos diversos mejoran la disponibilidad y estabilidad del nitrógeno en el suelo, debido a una mayor mineralización de la materia orgánica. De manera similar, Breza et al. (2023) encontraron que la rotación favorece la actividad microbiana, lo que contribuye a mantener niveles más equilibrados de nitrógeno mineral, incluyendo NH_3-N.

En este trabajo, aunque estadísticamente no se detectaron diferencias, los resultados apoyan la idea de que la rotación de cultivos ayuda a estabilizar el contenido de nitrógeno en el suelo, reforzando su uso como práctica de manejo sostenible.

7.1.7 Amoniaco

Los valores promedio de amoníaco (NH_3) del suelo a la profundidad de 0–10 cm fueron de 0.542 en la parcela con rotación de cultivos, y de 0.344 en la parcela de monocultivo. Referente a la profundidad de 10–25 cm, los valores promedio fueron de 0.418 en la parcela rotacional y de 1.176 en la parcela de monocultivo.

El análisis estadístico correspondiente al amoníaco no mostró diferencias significativas entre parcelas ($p = 0.3519$), ni entre profundidades ($p = 0.2430$) (Cuadro 7), y la interacción parcela × profundidad tampoco fue significativa ($p = 0.1212$), lo que indica que el comportamiento del amoníaco en el suelo no difiere entre los sistemas de manejo ni con la profundidad de muestreo.

Tabla 7. Amoniaco (NH_3) del suelo (mg kg^{-1}) en función de la parcela y la profundidad de muestreo

Parcela	Promedio	Profundidad	Promedio
Rotacional	0.4800 [a]	0-10 cm	0.4430 [a]
Monocultivo	0.7600 [a]	10-25 cm	0.7970 [a]

Medias seguidas por literales distintas dentro de cada columna indican diferencias significativas entre parcelas o profundidades de muestreo, según la prueba de comparación de medias realizada (p ≤ 0.05). Medias con la misma letra no difieren estadísticamente (p > 0.05).

Sin embargo, se observó que los valores en la parcela con rotación de cultivos fueron más equilibrados, mientras que en el monocultivo aumentaron considerablemente a la profundidad de 10–25 cm. Esto puede explicarse porque la rotación de cultivos mejora la fijación biológica de nitrógeno y promueve la actividad microbiana del suelo, manteniendo formas de nitrógeno más estables y aprovechables por los cultivos. Estos resultados coinciden con lo reportado por (Brady C. & Well R., 2016), quienes señalan que la rotación favorece la conservación de nutrientes; (Marschener, 2012), quien indica que la actividad microbiana se mantiene más estable en sistemas rotacionales; y (Tilman & Cassman, 2002), quienes observaron que el monocultivo puede generar acumulaciones irregulares de formas nitrogenadas, especialmente en capas más profundas. Por lo tanto, aunque las diferencias no fueron significativas, los resultados reflejan que la rotación de cultivos contribuye a la conservación del nitrógeno y a la fertilidad del suelo, coincidiendo con lo reportado por estos autores sobre la ventaja de los sistemas rotacionales frente al monocultivo.

7.1.8 Nitrato

Los valores promedio de nitrato (NO_3^-) del suelo a la profundidad de 0–10 cm fueron de 2.46 en la parcela con rotación de cultivos y de 1.94 en la parcela de monocultivo. Referente a la profundidad de 10–25 cm, los valores promedio fueron de 3.28 en la parcela rotacional y de 4.46 en la parcela de monocultivo.

El análisis estadístico correspondiente al nitrato no mostró diferencias significativas entre bloques (p = 0.726), ni entre profundidades (p = 0.462) (Cuadro 8), y la interacción bloque × profundidad tampoco fue significativa (p = 0.941), lo que indica que el comportamiento del nitrato en el suelo no difiere entre bloques ni con la profundidad de muestreo bajo las condiciones evaluadas.

Tabla 8. Amoniaco (NH_3) del suelo (mg kg^{-1}) en función de la parcela y la profundidad de muestreo

Parcela	Promedio	Profundidad	Promedio
Rotacional	2.87 [a]	0-10 cm	2.20 [a]
Monocultivo	2.44 [a]	10-25 cm	3.11 [a]

Medias seguidas por literales distintas dentro de cada columna indican diferencias significativas entre parcelas o profundidades de muestreo, según la prueba de comparación de medias realizada ($p \leq 0.05$). Medias con la misma letra no difieren estadísticamente ($p > 0.05$).

Los resultados obtenidos muestran que no existieron diferencias significativas en el contenido de nitrato entre parcelas ni entre profundidades, lo que indica que este nutriente presenta una distribución relativamente uniforme bajo los sistemas de manejo evaluados. Esta condición puede atribuirse a la alta movilidad del nitrato en el suelo, así como a su participación activa en procesos de absorción vegetal, lixiviación y transformación microbiológica, los cuales regulan continuamente su concentración dentro del perfil edáfico.

Estudios previos coinciden con estos hallazgos. Por ejemplo, (Brady & Weil, 2017) señalan que el nitrato constituye la forma más dinámica del nitrógeno mineral en el suelo, debido a su elevada solubilidad y movilidad, lo que frecuentemente impide detectar diferencias estadísticas entre tratamientos en evaluaciones puntuales. De manera similar, (Havilin & Nelson, 2014) reportan que las concentraciones de nitrato pueden presentar variaciones espaciales y temporales importantes, aun dentro de un mismo sistema de manejo, como resultado de la actividad microbiana y de las condiciones ambientales predominantes.

Por otra parte, diversos estudios han demostrado que los sistemas de rotación de cultivos influyen positivamente en la dinámica del nitrógeno del suelo, aunque estos efectos no siempre se reflejan en diferencias estadísticas inmediatas. (Liebman & Dyck, 1993) mencionan que la rotación favorece procesos biológicos asociados a la mineralización del nitrógeno mediante la diversificación de residuos vegetales y sistemas radicales, contribuyendo a una liberación más equilibrada de nutrientes. Asimismo, (Drinkwater, 1998) observaron que los sistemas rotacionales mejoran la

eficiencia del reciclaje del nitrógeno y promueven una mayor estabilidad nutricional del suelo en comparación con monocultivos continuos.

En el presente estudio, aunque las diferencias no fueron significativas, los valores promedio observados en la parcela con rotación en la capa superficial sugieren una tendencia hacia una mayor disponibilidad de nitrato, lo cual puede relacionarse con una mayor actividad biológica y aporte de materia orgánica derivados de la diversificación de cultivos. En este sentido, la rotación de cultivos puede contribuir a mejorar gradualmente la calidad del suelo y la eficiencia del uso del nitrógeno, favoreciendo la sostenibilidad del sistema productivo a largo plazo, aun cuando los efectos no sean estadísticamente detectables en evaluaciones de corto periodo.

7.1.9 Nitratos totales

Los valores promedio de nitratos totales del suelo a la profundidad de 0–10 cm fueron de 11.10 en la parcela con rotación de cultivos y de 8.52 en la parcela de monocultivo. Referente a la profundidad de 10–25 cm, los valores promedio fueron de 14.82 en la parcela rotacional y de 20.44 en la parcela de monocultivo.

El análisis estadístico correspondiente a los nitratos totales no mostró diferencias significativas entre bloques ($p = 0.689$), ni entre profundidades ($p = 0.453$) (Cuadro 9), y la interacción bloque × profundidad tampoco fue significativa ($p = 0.941$), lo que indica que el comportamiento de los nitratos totales en el suelo no difiere entre bloques ni con la profundidad de muestreo bajo las condiciones evaluadas.

Tabla 9. Nitratos totales (NO_3^-) del suelo (mg kg^{-1}) en función de la parcela y la profundidad de muestreo

Parcela	Promedio	Profundidad	Promedio
Rotacional	12.96 [a]	0-10 cm	9.81 [a]
Monocultivo	10.78 [a]	10-25 cm	13.93 [a]

Medias seguidas por literales distintas dentro de cada columna indican diferencias significativas entre parcelas o profundidades de muestreo, según la prueba de comparación de medias realizada ($p \leq 0.05$). Medias con la misma letra no difieren estadísticamente ($p > 0.05$).

Los resultados obtenidos muestran que no existieron diferencias significativas en el contenido de nitratos totales entre bloques ni entre profundidades, lo que sugiere que la disponibilidad de nitrógeno nítrico se mantiene relativamente estable, bajo los sistemas de manejo evaluados. Esta estabilidad puede atribuirse a la naturaleza altamente dinámica del nitrato en el suelo, caracterizada por su elevada solubilidad y movilidad, así como por su continua participación en procesos de absorción vegetal, lixiviación y transformación microbiana, los cuales regulan su distribución dentro del perfil edáfico.

Estudios previos coinciden con estos resultados. (Brady & Weil, 2017) señalan que el nitrato representa la forma más móvil del nitrógeno mineral en el suelo, por lo que su concentración puede mantenerse relativamente homogénea entre tratamientos y profundidades durante evaluaciones puntuales. De manera similar, Havlin et al. (2014) indican que las concentraciones de nitrógeno nítrico presentan alta variabilidad espacial y temporal debido a la influencia de factores ambientales y a la actividad microbiana responsable de los procesos de mineralización y nitrificación.

En el presente estudio, la rotación gramínea–leguminosa pudo favorecer el aporte biológico de nitrógeno al suelo mediante la fijación biológica asociada a la leguminosa, así como por la incorporación de residuos vegetales con diferentes relaciones carbono: nitrógeno. Aunque no se detectaron diferencias significativas, los valores promedio observados y su distribución en el perfil del suelo pueden estar relacionados con una liberación gradual del nitrógeno proveniente de dichos residuos, así como con una mayor actividad microbiana estimulada por la diversificación de cultivos. En este sentido, la rotación maíz–chícharo puede contribuir al mantenimiento progresivo de la fertilidad del suelo y a una mayor estabilidad del nitrógeno disponible, favoreciendo la sostenibilidad del sistema productivo a largo plazo.

7.1.10 Fosfato

Los valores promedio de fosfato (PO_4^{3-}) del suelo a la profundidad de 0–10 cm fueron de 5.96 en la parcela con rotación de cultivos y de 6.82 en la parcela de monocultivo. Referente a la profundidad de 10–25 cm, los valores promedio fueron de 5.44 en la parcela rotacional y de 6.14 en la parcela de monocultivo.

El análisis estadístico correspondiente al fosfato (PO_4^{3-}) no mostró diferencias significativas entre bloques (p = 0.427), ni entre profundidades (p = 0.539) (Cuadro 10), y la interacción bloque × profundidad tampoco fue significativa (p = 0.934), lo que indica que el comportamiento del fosfato en el suelo no difiere entre bloques ni con la profundidad de muestreo bajo las condiciones evaluadas.

Tabla 10. Fosfato (PO_4^{3-}) del suelo (mg kg^{-1}) en función de la parcela y la profundidad de muestreo

Parcela	Promedio	Profundidad	Promedio
Rotacional	5.70 [a]	0-10 cm	6.39 [a]
Monocultivo	6.48 [a]	10-25 cm	5.79 [a]

Medias seguidas por literales distintas dentro de cada columna indican diferencias significativas entre parcelas o profundidades de muestreo, según la prueba de comparación de medias realizada (p ≤ 0.05). Medias con la misma letra no difieren estadísticamente (p > 0.05).

Los resultados obtenidos muestran que no existieron diferencias significativas en el contenido de fosfato entre bloques ni entre profundidades, lo que sugiere que la disponibilidad de fósforo se mantiene relativamente estable bajo los sistemas de manejo evaluados. Este comportamiento puede atribuirse a la baja movilidad del fósforo en el suelo y a su fuerte interacción con los componentes minerales, lo que limita cambios rápidos en su distribución dentro del perfil edáfico.

Estudios previos coinciden con estos hallazgos. Brady y Weil (2017) señalan que el fósforo presenta una dinámica más lenta que otros nutrientes debido a procesos de adsorción y fijación en el suelo. De manera similar, Havlin et al. (2014) indican que las variaciones en fósforo disponible suelen observarse principalmente a largo plazo, ya que dependen de la mineralización de la materia orgánica y de la actividad biológica.

En sistemas de rotación, especialmente aquellos que combinan gramíneas y leguminosas, se ha reportado un favorecimiento gradual de la disponibilidad de nutrientes. Liebman y Dyck (1993) mencionan que la diversificación de cultivos incrementa la actividad radicular y microbiana, favoreciendo la solubilización del fósforo. En el presente estudio, la rotación maíz–chícharo pudo contribuir a mantener una dinámica estable del fósforo mediante el aporte de residuos orgánicos y la

estimulación biológica del suelo, lo que favorece la sostenibilidad del sistema productivo aun cuando no se detectaron diferencias estadísticas significativas.

7.1.11 Fósforo elemental (P)

Los valores promedio de fósforo elemental (P) del suelo a la profundidad de 0–10 cm fueron de 1.96 en la parcela con rotación de cultivos y de 2.22 en la parcela de monocultivo. Referente a la profundidad de 10–25 cm, los valores promedio fueron de 1.80 en la parcela rotacional y de 1.92 en la parcela de monocultivo.

El análisis estadístico correspondiente al fósforo elemental (P) no mostró diferencias significativas entre bloques (p = 0.541), ni entre profundidades de muestreo (p = 0.461). De igual manera, la interacción bloque × profundidad tampoco presentó efecto significativo (p = 0.821), lo que indica que la concentración de fósforo elemental en el suelo se mantuvo similar entre los bloques evaluados y a las diferentes profundidades analizadas bajo las condiciones del estudio.

Tabla 11. Fósforo elemental (P) del suelo (mg kg $^{-1}$) en función de la parcela y la profundidad de muestreo

Parcela	Promedio	Profundidad	Promedio
Rotacional	5.70 [a]	0-10 cm	6.39 [a]
Monocultivo	6.48 [a]	10-25 cm	5.79 [a]

Medias seguidas por literales distintas dentro de cada columna indican diferencias significativas entre parcelas o profundidades de muestreo, según la prueba de comparación de medias realizada (p ≤ 0.05). Medias con la misma letra no difieren estadísticamente (p > 0.05).

Los resultados obtenidos muestran que el fósforo elemental no presentó diferencias estadísticas significativas entre bloques ni entre profundidades de muestreo, lo que indica una distribución relativamente uniforme de este nutriente dentro del suelo evaluado. Este comportamiento puede explicarse por la escasa movilidad del fósforo en el perfil del suelo, ya que normalmente queda retenido mediante procesos de adsorción y precipitación con minerales presentes en la fracción sólida, limitando su desplazamiento vertical. Según (Castellanos & Aguilar, 2000), en la mayoría de los suelos agrícolas el fósforo tiende a permanecer estable debido a su fuerte interacción

con componentes minerales, lo que reduce cambios marcados entre estratos del suelo. De manera similar, Etchevers Barra (2005) señala que la dinámica del fósforo está fuertemente controlada por procesos químicos y biológicos que favorecen su acumulación local más que su redistribución dentro del perfil edáfico (Etchevers barra, 2005). Por ello, pequeñas variaciones observadas entre tratamientos pueden asociarse a diferencias naturales del suelo o a la actividad microbiana relacionada con la descomposición de residuos vegetales, sin generar efectos estadísticamente detectables.

7.1.12 Pentóxido de fósforo (P_2O_5)

Los valores promedio de pentóxido de fósforo (P_2O_5) del suelo a la profundidad de 0–10 cm fueron de 4.46 en la parcela con rotación de cultivos y de 5.12 en la parcela de monocultivo. Referente a la profundidad de 10–25 cm, los valores promedio fueron de 3.64 en la parcela rotacional y de 3.72 en la parcela de monocultivo.

El análisis estadístico correspondiente al pentóxido de fósforo (P_2O_5) no mostró diferencias significativas entre bloques (p = 0 .663), ni entre profundidades (p = 0.205) (Cuadro 12), y la interacción bloque × profundidad tampoco fue significativa (p = 0.733), lo que indica que el comportamiento del pentóxido de fósforo en el suelo no difiere entre bloques ni con la profundidad de muestreo bajo las condiciones evaluadas.

Tabla 12. Pentóxido de fósforo (P_2O_5) del suelo (mg kg^{-1}) en función de la parcela y la profundidad de muestreo

Parcela	Promedio	Profundidad	Promedio
Rotacional	4.05 [a]	0-10 cm	4.79 [a]
Monocultivo	4.42 [a]	10-25 cm	3.68 [a]

Medias seguidas por literales distintas dentro de cada columna indican diferencias significativas entre parcelas o profundidades de muestreo, según la prueba de comparación de medias realizada (p ≤ 0.05). Medias con la misma letra no difieren estadísticamente (p > 0.05).

Los resultados obtenidos indican que no hubo diferencias significativas en los niveles de pentóxido de fósforo (P_2O_5) entre bloques ni entre profundidades, lo que sugiere

que la disponibilidad de este nutriente se mantiene relativamente uniforme bajo los sistemas de manejo evaluados. Esta estabilidad se explica por la baja movilidad del P_2O_5 en el suelo y su tendencia a unirse a minerales, limitando cambios rápidos a lo largo del perfil edáfico.

Los valores ligeramente más altos observados en los bloques de la parcela rotacional podrían relacionarse con la incorporación de residuos orgánicos provenientes de la rotación maíz–chícharo, que favorecen un aporte progresivo de fósforo y estimulan la actividad microbiana en la capa superficial. En contraste, los valores ligeramente superiores en la profundidad del monocultivo podrían explicarse por la acumulación localizada de residuos homogéneos, lo que libera fósforo de manera más concentrada en capas superficiales.

Aunque no se detectaron diferencias estadísticas significativas, la rotación maíz–chícharo permite un manejo más equilibrado del pentóxido de fósforo a lo largo del tiempo, promoviendo un reciclaje gradual de nutrientes y contribuyendo a la sostenibilidad del sistema productivo mediante la estimulación biológica del suelo y la optimización de la disponibilidad de P_2O_5.

7.1.13 Potasio (K) y Óxido de Potasio (K_2O)

Se evaluó el contenido de potasio (K) y su equivalente como óxido de potasio (K_2O) en el suelo tomando una muestra por profundidad en cada sistema de manejo. Los valores observados fueron los siguientes (cuadro 13).

Tabla 13. Pentóxido de fósforo (P_2O_5) del suelo (mg kg^{-1}) en función de la parcela y la profundidad de muestreo

Profundidad (cm)	Sistema de manejo	Potasio (K)	Oxido de potasio (K_2O)
0 – 10	Rotación	1.5	1.27
0 –10	Monocultivo	0.9	1.05
10 – 25	Rotación	1.1	1.3
10 – 25	Monocultivo	2.3	2.7

Debido a que solo se cuenta con una muestra por profundidad, no se realizó análisis, por lo tanto, los resultados deben considerarse observaciones descriptivas.

Se observa que los valores de potasio y óxido de potasio muestran tendencias similares, lo que refleja la dinámica del nutriente en los sistemas evaluados. Los valores más altos en la capa superficial de la parcela rotacional podrían relacionarse con la incorporación de residuos de maíz y chícharo, que aportan potasio de forma gradual mediante la mineralización de biomasa y la estimulación de la actividad microbiana. Por su parte, los valores superiores en la profundidad del monocultivo podrían indicar redistribución hacia capas más profundas, favorecida por la ausencia de rotación y la menor cobertura vegetal superficial (Nuñez Peñaloza & Perez Nieto, 2023)

Aunque los resultados son descriptivos, estas observaciones sugieren que la rotación de cultivos puede favorecer la disponibilidad de potasio en la capa superficial, contribuyendo a un aprovechamiento más equilibrado del nutriente, estimulando la actividad biológica y promoviendo la sostenibilidad del suelo a largo plazo.

7.2 Características físicas

7.2.1 Color del suelo

Se muestra la caracterización del color del suelo en ambos sistemas de manejo (rotación de cultivos y monocultivo) a dos profundidades (0–10 cm y 10–25 cm), utilizando la carta de colores Munsell. Los resultados evidencian variaciones en la tonalidad del suelo tanto entre sistemas como entre profundidades, lo cual permite inferir diferencias en las condiciones edáficas y en la dinámica de la materia orgánica.

En el sistema de rotación de cultivos, el color pardo rojizo en la capa superficial (0–10 cm) y el pardo rojizo oscuro en la capa subsuperficial (10–25 cm) sugieren la presencia de condiciones de buena aireación y drenaje, así como una mayor influencia de óxidos de hierro. La tonalidad más oscura en profundidad puede asociarse a una acumulación relativa de materiales finos y compuestos orgánicos estabilizados, lo que refleja un suelo con una buena estructura. (Rucks & Garcia, 2004)

Por su parte, en el sistema de monocultivo, el color pardo amarillento en la capa superficial indica menor contenido de materia orgánica y mayor predominancia de óxidos de hierro hidratados, lo que suele asociarse con suelos más degradados o con menor actividad biológica. En la profundidad de 10–25 cm, el color pardo oscuro puede relacionarse con una ligera acumulación de materia orgánica más estabilizada; sin embargo, este patrón vertical sugiere una distribución menos homogénea de la materia orgánica dentro del perfil. (Medina, 2019)

En conjunto, los resultados de color del suelo indican que el sistema de rotación de cultivos presenta condiciones edáficas más favorables, reflejadas en tonalidades más asociadas a buena aireación, estabilidad estructural y mayor actividad biológica, mientras que el monocultivo muestra señales de menor calidad superficial del suelo. Por lo tanto, el análisis del color del suelo respalda la tendencia general observada en otras propiedades físicas y químicas, confirmando que la rotación de cultivos contribuye a una mejor calidad integral del suelo.

Tabla 14. Color del suelo en función de la parcela y la profundidad de muestreo, determinado mediante la carta de colores Munsell

Sistema de manejo	Profundidad	Color
Rotación (P1)	0 – 10 cm	Pardo rojizo
Monocultivo (P2)	0 -10 cm	Pardo amarillento
Rotación (P1)	10 – 25 cm	Pardo rojizo obscuro
Monocultivo (P2)	10- 25 cm	Pardo obscuro

7.2.2 Textura del suelo

Se muestra la clasificación textural del suelo en ambos sistemas de manejo (rotación de cultivos y monocultivo) a dos profundidades (0–10 cm y 10–25 cm). Los resultados evidencian diferencias en la textura del suelo entre sistemas, lo cual tiene implicaciones directas sobre la retención de humedad, la aireación y la dinámica de nutrientes.

En el sistema de rotación de cultivos, la textura del suelo en la capa superficial (0–10 cm) fue franco arenoso, mientras que en la profundidad de 10–25 cm se clasificó como arenoso franco. Estas texturas indican un equilibrio relativamente adecuado entre

partículas de arena y fracciones más finas (limo y arcilla), lo que favorece tanto la infiltración de agua como la retención de humedad y nutrientes. De acuerdo con Brady y Weil (2008), los suelos de textura franca o moderadamente gruesa presentan mejores condiciones para el desarrollo radicular, debido a una combinación adecuada de aireación y capacidad de retención de agua.

Por otro lado, en el sistema de monocultivo, la textura del suelo fue arenosa en ambas profundidades evaluadas (0–10 cm y 10–25 cm). Este tipo de textura se caracteriza por una alta proporción de partículas gruesas, lo que favorece la rápida infiltración de agua, pero limita significativamente la retención de humedad y nutrientes. Según Havlin et al. (2014), los suelos arenosos presentan menor capacidad de intercambio catiónico y son más susceptibles a la lixiviación de nutrientes, lo que puede afectar la fertilidad del suelo y la eficiencia del uso de insumos agrícolas.

La diferencia observada entre sistemas sugiere que la rotación de cultivos ha contribuido a una ligera mejora en la condición textural del suelo superficial, posiblemente debido a la incorporación de residuos orgánicos y a una mayor actividad biológica, lo cual favorece la agregación de partículas finas. En contraste, el monocultivo mantiene una textura predominantemente arenosa en todo el perfil evaluado, lo que indica menor modificación estructural del suelo.

En conjunto, aunque la textura del suelo está fuertemente determinada por el material parental y no cambia rápidamente, los resultados indican que el sistema de rotación de cultivos presenta condiciones más favorables en la capa superficial, al mostrar una textura menos extrema que puede contribuir a una mejor retención de agua y nutrientes. En contraste, el monocultivo presenta limitaciones asociadas a su textura arenosa, lo que puede impactar negativamente la calidad del suelo y su productividad a largo plazo.

Tabla 15. Textura del suelo en función de la parcela y la profundidad de muestreo

sistema de manejo	**Profundidad**	**Arena (%)**	**Limo (%)**	**Arcilla (%)**	**clase textural**
Rotación (P1)	0 – 10 cm	79.0	9.4	11.6	Franco arenoso

Rotación (P1)	10 -25 cm	83.7	0.7	15.6	Arenoso franco
Monocultivo (P2)	0 – 10 cm	89.2	4.0	6.8	Arenosa
Monocultivo (P2)	10- 25 cm	89.8	2.4	7.8	Arenosa

7.2.3 Densidad aparente del suelo

se presenta los valores de densidad aparente del suelo en los dos sistemas de manejo evaluados (rotación de cultivos y monocultivo) a las profundidades de 0–10 cm y 10–25 cm. Los resultados muestran que la densidad aparente fue de 1.1 g cm^{-3} en ambas parcelas y en ambas profundidades, sin observarse variación entre tratamientos.

Estos valores se consideran relativamente bajos, lo que indica una adecuada condición física del suelo, caracterizada por una buena porosidad y una estructura favorable para el desarrollo radicular. De acuerdo con Brady y Weil (2008), valores de densidad aparente cercanos a 1.1 g cm^{-3} son típicos de suelos con buena estructura, alta actividad biológica y adecuado contenido de materia orgánica, lo cual favorece la infiltración de agua y el crecimiento de las raíces.

La ausencia de diferencias entre sistemas de manejo sugiere que, bajo las condiciones del estudio, ni la rotación de cultivos ni el monocultivo generaron cambios significativos en la compactación del suelo. Esto puede atribuirse a que la densidad aparente es una propiedad física que generalmente presenta cambios lentos y depende en gran medida de factores como la textura, el contenido de materia orgánica y el manejo mecánico del suelo (Havlin et al., 2014).

Asimismo, la similitud de valores entre profundidades indica que no existe un grado importante de compactación subsuperficial, lo cual es favorable para la penetración de raíces y el movimiento de agua en el perfil del suelo. Este comportamiento sugiere que las prácticas de manejo implementadas en ambos sistemas no han generado condiciones restrictivas para el desarrollo del cultivo.

En conjunto, los resultados indican que ambos sistemas presentan una condición física adecuada en términos de densidad aparente, sin evidencia de compactación. Por lo tanto, esta variable no mostró diferencias entre tratamientos, pero confirma que el suelo mantiene características favorables para el desarrollo vegetal en ambos sistemas de manejo.

Tabla 16. Densidad aparente del suelo (g cm $^{-3}$) en función de la parcela y la profundidad de muestreo

sistema de manejo	**Profundidad**	**Densidad aparente (g/cm^3)**
Rotación (P1)	0 – 10 cm	1.1
Monocultivo (P1)	0 – 10 cm	1.1
Rotación (P2)	10 – 25 cm	1.1
Monocultivo (P2)	10 - 25 cm	1.1

VIII. CONCLUSIONES

En este estudio se compararon las propiedades físicas y químicas del suelo en dos sistemas de manejo: monocultivo de maíz y rotación de cultivos (maíz, haba y chícharo) en la comunidad de Plutarco González, Estado de México. De acuerdo con los resultados, ambos tipos de suelo presentan características similares, ya que no se encontraron diferencias significativas en la mayoría de las variables evaluadas. Sin embargo, el sistema de rotación mostró algunas ventajas, como una ligera mejora en la materia orgánica y en la fertilidad del suelo, lo que indica que este sistema puede ser más favorable con el paso del tiempo.

El monocultivo de maíz tiene la ventaja de ser más sencillo de manejar y permite una producción más uniforme, pero también puede provocar desgaste del suelo, pérdida de nutrientes y compactación. En cambio, la rotación de cultivos ayuda a mejorar las condiciones del suelo, ya que diferentes plantas aprovechan y aportan distintos nutrientes, lo que favorece su conservación, En particular, la inclusión de leguminosas como el haba (Vicia faba L.) y el chícharo (Pisum sativum L.) representa un beneficio

importante, debido a su capacidad de fijar nitrógeno atmosférico mediante su asociación con bacterias del género Rhizobium, lo que incrementa la disponibilidad de este nutriente en el suelo Asimismo, al finalizar la cosecha, los residuos vegetales raíces, tallos y hojas se incorporan al suelo, aportando materia orgánica. Este proceso mejora la estructura del suelo, incrementa la retención de humedad, estimula la actividad microbiana y favorece la liberación gradual de nutrientes para cultivos posteriores (Havilin & Nelson, 2014).

En cuanto a la profundidad, la capa superficial del suelo (0–10 cm) presentó mejores condiciones de fertilidad que la capa más profunda (10–25 cm), debido a que contiene más materia orgánica y actividad biológica. Esto es importante porque en esta zona se desarrolla la mayor parte de las raíces, lo que permite una mejor absorción de agua y nutrientes por parte de los cultivos.

Finalmente, la rotación entre gramíneas como el maíz y leguminosas como el haba y el chícharo es una práctica importante, ya que las leguminosas ayudan a fijar nitrógeno en el suelo y aumentan la materia orgánica. Esto contribuye a mejorar la fertilidad y a reducir el uso de fertilizantes químicos.

En conclusión, aunque no se encontraron grandes diferencias entre los sistemas en el corto plazo, la rotación de cultivos es una mejor opción para mantener y mejorar la calidad del suelo a largo plazo.

IX. REFERENCIAS

Referencias

Aguilar Merino, C. S. (2021). EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL SUELO AGRÍCOLA. Euador .

Altieri A., M. (2010). *Agroecologia (bases cientificas para una agricultura sustentable).* Obtenido de https://agroeco.org/wp-content/uploads/2010/10/Libro-Agroecologia.pdf

Alvarez Aragon, R., & Rameirez Parra, E. (27 de Febrero de 2023). *La simbiosis entre leguminosas y bacterias fijadoras de nitrógeno*. Obtenido de https://www.cbgp.upm.es/index.php/es/allcategories-es-es/41-noticias-2023/937-la-simbiosis-entre-leguminosas-y-bacterias-fijadoras-de-nitrogeno-promueve-tolerancia-a-sequia

Alvarez Sanchez, M. E., & Maldonado Torres, R. (2007). *Manejo agroecológico para la restauración de la calidad del suelo.* Obtenido de https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7498394

Brady C., N., & Well R., R. (01 de 03 de 2016). *La naturaleza y propiedades de los suelos* . Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/301200878_The_Nature_and_Properties_of_Soils_15th_edition

Brady, N. C., & Weil, R. R. (2017). *The nature and properties of solis*.

Burbano, H. (junio de 2017). *LA CALIDAD Y SALUD DEL SUELO INFLUYEN SOBRE LA NATURALEZA Y LA SOCIEDAD.* Obtenido de http://scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0124-86932017000100007

Cadena Iñiguez, J. (diciembre de 2017). *Clasificasion y cartografia de suelos del estado de Campeche, Mexico*. Obtenido de https://www.colpos.mx/wb_pdf/Agroproductividad/2017/AP-10-12-2017_ISSN-e.pdf

Cartez Sánchez, g. (Octubre de 2013). *degradacion de suelos agricolas y el SIRSD-S.* Obtenido de https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2013/10/SueloAgricola201310.pdf

Castellanos, J. Z., & Aguilar, A. (2000). *Manual de interpretacionde analisis de suelos y agua. istituto de capacitacion para la productividad agricola.*

Contreras, J., & Diaz, R. (21 de Marzo de 2018). *CAMBIOS EN LA FERTILIDAD DEL SUELO POR EFECTO DE MONOCULTIVOS EN UN SUELO REGOSOL TIPICO DE SERDAN.* Obtenido de https://www.somecta.org.mx/Revistas/2018-1/2018-1/CAMBIOS%20EN%20LA%20FERTILIDAD%20DEL%20SUELO.pdf

Cruz Mamani, E. H. (07 de Julio de 2023). *Efecto de la materia organica en las propiedades fisicas, quimicas del suelo y el rendimiento del maiz morado en el fundo Los pichones*

Tacna. Obtenido de https://revistas.unjbg.edu.pe/index.php/cyd/article/download/1952/2169

Docampo, R. (2022). *La importancia de la materia organica del suelo y su manejo en produccion fruticola*. Obtenido de https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/1199/1/128221131113111309.pdf

Drinkwater, L. E. (1998). *Legume based cropping systems have reduced carbon and nitrogen losses* .

Etchevers barra, j. D. (3 de Mayo de 2005). *La fertilidad de los suelos de ladera de la sierra norte de Oaxaca*. Obtenido de https://www.redalyc.org/pdf/302/30239302.pdf

FAO. (2002). *Los fertilizantes y su uso.* Obtenido de https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/d81ae4cf-54e9-421d-8bac-d36719b2eaf0/content

FAO. (2015). *Los suelos ayudan a combatir y adaptarse al cambio climático.* Obtenido de https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/27afefc7-e73e-4c91-ba7d-cd113115cf7a/content

FAO. (2015). *status of the world´s soil resources.* Obtenido de https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/6ec24d75-19bd-4f1f-b1c5-5becf50d0871/content

FAO. (2021). *Portal de Suelos de la FAO.* Obtenido de https://www.fao.org/soils-portal/about/definiciones/es/

FAO. (s.f.). *Portal de sueolos de la FAO.* Obtenido de https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/clasificacion-de-suelos/sistemas-numericos/propiedades-quimicas/es/

Flores Delgadillo, L. (s.f.). *Manual de procedimientos analiticos* .

Galindo Gomez, J. (mayo de 2012). *Uso potencial del suelo en tres predios del ejido "El Sabino" municipio de Tamasopo S.L.P:*. Obtenido de https://repositorioinstitucional.uaslp.mx/xmlui/bitstream/handle/i/3460/IAF1USO01201.pdf?sequence=1

Garrido Valero, M. S. (s.f.). *INTERPRETACION DEANALISIS DE SU ELOS*. Obtenido de https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/hojas/hd_1993_05.pdf

Gomez D., j., & Monterroso I., a. (21 de febrero de 2022). *Carbono orgánico del suelo y su relación con la biomasa radical de Quercus sp.* Obtenido de https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712021000400109#c1

Gonzales, P., & R, D. (abril de 2 de 2007). *VARIABILIDAD ESPACIAL DEL pH DEL SUELO EN TRES PARCELAS AGRICOLAS.* Obtenido de https://www.redalyc.org/pdf/573/57325213.pdf

Gutiérrez, E. V., & Alberto, O. C. (febrero de 2015). *Manejo integrado de nutrientes en sistemas agrícolas intensivos.* Obtenido de http://scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342015000100017

Havilin, J. L., & Nelson, W. L. (2014). *Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management.*

Havlin, J. L., & Nelson, W. L. (2013). *Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management* .

Hernandez, A., & Garcia, S. A. (2021). *Situación actual del recurso suelo en México y la incorporación de abonos orgánicos como estrategia para su conservación*. Obtenido de https://ru.iiec.unam.mx/5454/1/070-Hern%C3%A1ndez-%C3%81vila-Garc%C3%ADa.pdf

Hernandez, T., & Zerega, L. (1999). *Efectos del nitrogeno organico y mineral sobre el rendimiento de la caña de azucar*.

Higuera Piedrahita, R. I. (2014). *Evaluación de la Calidad del Suelo Guía rápida de aspectos básicos de evaluación del suelo.* Recuperado el 07 de mayo de 2025, de https://avalon.cuautitlan.unam.mx/bromatologia/pdf/evaluacion_calidad_suelo.pdf

INECC, I. d. (2022).

INEGI, I. N. (2007). *Edafologia: Conjunto Nacional de informacion de suelos* .

Jaramillo, J. (2002). *La Consistencia del Suelo y Sus Implicaciones Agronómicas.*

Jordan Lopez, A. (2006). *Manual de edafologia* . Obtenido de https://avdiaz.wordpress.com/wp-content/uploads/2008/08/suelo-completo.pdf

Liebman, M. .., & Dyck, E. (1993). *Crop rotation and intercropping strategies for weed management.*

Lizcano, L. J., & Olivera, M. A. (2017). *Analisis de suelos y su interpretacion para la fertilidad. Universidad nacional de Colombia.*

Lopez Bellido, L. (2011). *Gia practica de la fertilizacion racional de los cultivos en España.* Obtenido de https://www.lgseeds.es/media/guia-practica-fertilizacion-cultivos-ii.pdf

Marquez Aguilar, G. (15 de septiembre de 2025). Obtenido de https://repositorioinstitucional.buap.mx/items/4dfa34a6-1e72-47fb-bccb-687c117acf6f

Marquez Agular, G., & Hernandez Lopez, J. A. (15 de Septiembre de 2025). *Acidez del suelo y su relacion con la materia organica y la acumulacion de nitratos en los suelos de Ixtenco, Tlaxcala*. Obtenido de https://repositorioinstitucional.buap.mx/items/4dfa34a6-1e72-47fb-bccb-687c117acf6f

Marschener, P. (2012). *Nutricion mineral de plantas.*

Martínez Méndez, O. (agosto de 2011). *CAPACIDAD DEL USO POTENCIAL DEL SUELO EN CUATRO PREDIOS DEL EJIDO "LAS ABRITAS", MUNICIPIO EL NARANJO, S.L.P.* Obtenido de https://repositorioinstitucional.uaslp.mx/xmlui/bitstream/handle/i/3390/IAF1CAP01102.pdf?sequence=1

Martínez, J. (17 de mayo de 2022). *Factores biológicos y químicos de fertilizantes nitrogenados y fosfatados en suelos agrícolas y sus posibles estrategiasde*

recuperación en México. Obtenido de https://repositorio.xoc.uam.mx/jspui/bitstream/123456789/26732/1/250157.pdf

Medina, L. E. (Agosto de 2019). flujos de carbono en humedales naturales de la ribera del lago de Patzcuaro, Michoacan, Mexico.

Milena Marín, S. (octubre de 2010). *La Materia organica componente esencial en la sostenibilidad de los agroecosistemas cafeteros.* Obtenido de https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/1113/3/libroMO.pdf

Molina Gonzalez, L., & Mireles Acosta, M. (Noviembre de 2014). *cambios de carbon organico del suelo bajo escenarios de cambio de uso del suelo en Mexico*.

Montaño, N. M., & Navarro, M. d. (14 de julio de 2017). *El suelo y su multifuncionalidad: ¿qué ocurre ahí abajo?* Obtenido de https://www.redalyc.org/journal/104/10455646009/html/

Morales, P. (12 de diciembre de 2023). *Aumenta la eficiencia de tu cultivo con sistemas de dosificación precisa de nutrientes.* Obtenido de https://edumasterplus.cl/aumenta-la-eficiencia-de-tu-cultivo-con-sistemas-de-dosificacion-precisa-de-nutrientes/

Mosquera, M. I. (22 de marzo de 2021). *PROPIEDADES DE LOS SUELOS. "Estructura".* Obtenido de file:///C:/Users/TEMP/Downloads/39dcb2fe2d6419ed1c9248c0bf67a8fb.pdf

NTF. (Julio de 2019). *La salinidad del suelo y su fertilidad.* Obtenido de https://www.fertilab.com.mx/Sitio/notas/NTF-19-025-La-salinidad-del-suelo-y-su-fertilidad.pdf

Nuñez Peñaloza, J. L., & Perez Nieto, J. (2023). *Analisis de indicadores e indices de calidad de suelos en Mexico*. Obtenido de https://cienciasagricolas.inifap.gob.mx/index.php/agricolas/article/view/3148

ONU, O. d. (2018). *GUIA DE BUENAS PARA LA GESTION Y USO SOSTENIBLE DE LOS EN AREAS RURALES.*

Osuna Ceja, E., & Figueroa Sandoval, B. (1 de febrero de 2006). *Efecto de la estructura del suelo sobre el desarrollo radical del maíz con dos sistemas de labranza.* Obtenido de https://www.redalyc.org/pdf/302/30240103.pdf

Paz, F., & Etchevers, J. D. (2002). *Carbono organico en suelos de Mexico* .

Perez Cortez, F. (JULIO de 2020). Obtenido de MUESTREO Y DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE SUELOS CON BOSQUE NATURAL Y PLANTACIONES COMERCIALES: https://repositorio.chapingo.edu.mx/server/api/core/bitstreams/a24d0ad5-350d-480c-a978-931f09c9d19d/content

piedrahita, O. (2009). *que es el ph del suelo* . Obtenido de https://infoagronomo.net/que-es-el-ph-del-suelo/

Piñeiro, G., & Pinto, P. (2021). *La salud del suelo y la sustentabilidad de los agroecosistemas.* Obtenido de

https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/208835/CONICET_Digital_Nro.e2d0d0fd-de97-4070-859c-b4b3c80bc024_Z.pdf?sequence=5

Ramirez Carvajal, R. (09 de 12 de 2023). *propiedades fisicas, quimicas y biologicas del suelo*. Obtenido de https://infoagronomo.net/propiedades-del-suelo-fisicas-quimicas-biologicas/

Ramirez Carvajal, R. (s.f.). *Propiedades fisicas, quimicas y biologocas del suelo* . Obtenido de https://infoagronomo.net/propiedades-del-suelo-fisicas-quimicas-biologicas/

Ramirez Garcia, J. M. (2013). *Propiedades Fisicas del suelo y su influencia en el desarrollo radicular del Maiz* .

Reyes Sanchez, F. d. (mayo de 2025). *Sistemas agroforestales como estrategia de manejo en suelos degradados del seminario*. Obtenido de https://repositorio.chapingo.edu.mx/server/api/core/bitstreams/5ce04691-a76f-4040-ae1a-ea967b853d1a/content

reyes, A. K. (29 de Enero de 2015). *Evaluación de la sostenibilidad del sistema de manejo de suelos, en agroecosistemas campesinos de Cacaloxúchitl de Ayala, Huaquechula, Puebla*. Obtenido de http://colposdigital.colpos.mx:8080/jspui/handle/10521/2529?show=full

Ricardo, R. (24 de NOVIEMBRE de 2024). *¿Qué es el monocultivo y cómo afecta al suelo?* Obtenido de https://estudyando.com/que-es-el-monocultivo-y-como-afecta-al-suelo/

Roman, A., & Matamoros, M. (2004). *Fijacion Biologica de Nitrogeno, una forma sostenible de producir alimentos*. Obtenido de https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/10450785.pdf

Rucks, L., & Garcia. (2004). *propiedades fisicas del suelo.* Obtenido de http://bibliofagro.pbworks.com/f/propiedades+fisicas+del+suelo.pdf

Ruralinfo. (2005). *Cómo mejorar la eficiencia de los fertilizantes: Técnicas de aplicación y dosificación.* Obtenido de https://ruralinfo.puntanetwork.com/productos-y-servicios-agricolas/como-mejorar-eficiencia-fertilizantes-tecnicas-aplicacion-dosificacion/

SADER. (10 de Abril de 2024). *Maximizando la tierra: La rotación de cultivos.* Obtenido de https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/maximizando-la-tierra-la-rotacion-de-cultivos?idiom=es

SAGARPA. (08 de Abril de 2024). *Estudios de suelos: del campo al laboratorio.* Obtenido de https://www.gob.mx/agricultura/articulos/estudios-de-suelos-del-campo-al-laboratorio?idiom=es

Salazar, J. (s.f.). *ABONOS ORGÁNICOS Y PLASTICULTURA.* Obtenido de https://www.smcsmx.org/files/books/abonos_org.pdf

Sanchez V, J. (2024). *Fertilidad del suelo y nutricion mineral de plantas*. Obtenido de https://www.exa.unne.edu.ar/biologia/fisiologia.vegetal/FERTILIDAD%20DEL%20SUELO%20Y%20NUTRICION.pdf

Santiago Mejia, B. E. (2016). *Evaluacion de las obras de conservacion de suelosen la mixteca alta de Oaxaca*. Obtenido de http://colposdigital.colpos.mx:8080/jspui/bitstream/handle/10521/3462/Santiago_Mejia_BE_MC_Hidrociencias_2016.pdf?sequence=1

Sanzano, A. (2002). *El fosforo del suelo.* Obtenido de file:///C:/Users/mlfa1/Downloads/El%20Fosforo%20del%20suelo%20(2).pdf

Sanzano, A. (2002). *Fosforo del suelo* . Obtenido de https://s9a0d11af78cd478d.jimcontent.com/download/version/1563476239/module/7956239776/name/El%20Fosforo%20del%20suelo.pdf

SEMARNAT. (2015). *informe de la situacion del medio ambiente en mexico en 2015.* Obtenido de https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/pdf/Informe15_completo.pdf

SEMARNAT, S. d. (31 de Diciembre de 2002). *Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis*. Obtenido de https://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69255.pdf

Thompson, L. M. (Agosto de 2011). Los suelos y su fertilidad. España: Editorial Reverté, S. A., 1982 ISBN 978-84-291-1041-8. Obtenido de https://repositorioinstitucional.uaslp.mx/xmlui/bitstream/handle/i/3390/IAF1CAP01102.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Thompson, L. M., & Troeh, F. R. (2021). *Los suelos y su fertilidad.* Obtenido de https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9788429190014_A41065802/preview-9788429190014_A41065802.pdf

Tilman, D., & Cassman, K. G. (2002). *Agrricultural sustainability and intensive production practices.*

USDA, U. S. (1999). *Soil quality test kit guide* .

valdes hernandez, G. (SEPTIEMBRE de 2023). *USO DEL VERMICOMPOST Y COMPOST EN LA RECUPERACIÓN DE*. Obtenido de file:///C:/Users/mlfa1/OneDrive/Documentos/Tesis%20Gisela.%20USO%20DEL%20VERMICOMPOST%20Y%20COMPOST%20EN%20LA%20RECUPERACION.pdf

Valdes Hernandez, G. D. (septiembre de 2022). *USO DEL VERMICOMPOST Y COMPOST EN LA RECUPERACIÓN DE SUELOS DEGRADADOS DE PASTIZALES NATURALES EN EL PEÑÓN, TEMASCALTEPEC ESTADO DE MÉXICO.*

Villena, M., & Lopez, H. (Diciembre de 2022). *Fertilización sostenible y gestión Integral de nutrientes*. Obtenido de https://bibliotecadigital.ciren.cl/server/api/core/bitstreams/4149a490-eec5-4413-a123-10218a8574ca/content

Zansano, A. (2002). *El potasio del suelo* . Obtenido de https://s9a0d11af78cd478d.jimcontent.com/download/version/1494945225/module/7956241476/name/El%20Potasio%20del%20suelo.pdf