



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO



**DIVISIÓN DE CIENCIAS FORESTALES
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES**

**ESTADO DE LA FERTILIDAD DEL SUELO EN TRES
SISTEMAS DE PRODUCCIÓN: FORESTAL, AGRÍCOLA
Y PASTIZAL**

TESIS DE GRADO

Que como requisito parcial para
obtener el grado de:

Maestro en Ciencias en Ciencias Forestales



DIRECCION GENERAL ACADEMICA
DPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES

Presenta:

NUÑEZ PEÑALOZA JORGE LUIS

Bajo la supervisión de:

DR. DAVID CRISTÓBAL ACEVEDO

Chapingo, Estado de México, 5 de diciembre de 2019

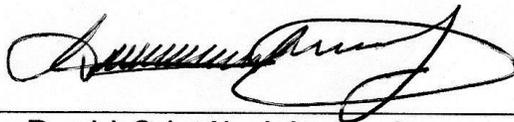


ESTADO DE LA FERTILIDAD DEL SUELO EN TRES SISTEMAS DE PRODUCCIÓN: FORESTAL, AGRÍCOLA Y PASTIZAL

Tesis realizada por **JORGE LUIS NUÑEZ PEÑALOZA** bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

DIRECTOR:



Dr. David Cristóbal Acevedo

ASESOR:



Dra. Elizabeth Hernández Acosta

ASESOR:



M. C. Antonio Villanueva Morales

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN GENERAL	15
2. REVISIÓN DE LITERATURA	17
2.1. El concepto de suelo.....	17
2.2. Suelo superficial y subsuperficial.....	18
2.3. Fertilidad del suelo.....	18
2.4. Propiedades físicas del suelo	18
2.5. Estudios de propiedades físicas de suelos en distintos sistemas de manejo.....	19
2.6. Propiedades químicas del suelo	21
2.7. Estudios de propiedades químicas de suelos en distintos sistemas de manejo.....	22
2.8. Propiedades biológicas.....	27
2.9. Estudios de propiedades biológicas de suelos en distintos sistemas de manejo.....	27
2.10. Conclusiones sobre estudios de propiedades físicas, químicas y biológicas en los suelos.....	29
2.11. Degradación del suelo.....	30
2.12. Calidad del suelo	33
2.13. Referencias	34
3. EFECTO DE TRES SISTEMAS DE PRODUCCIÓN SOBRE EL ESTADO DE LA FERTILIDAD FÍSICA DEL SUELO	40
3.1. RESUMEN/ABSTRACT	40
3.2. INTRODUCCIÓN.....	41
3.3. MATERIALES Y MÉTODOS	43
3.3.1. Área de estudio	43
3.3.2. Muestreo de suelos y análisis de laboratorio.....	44
3.3.3. Análisis estadístico	46
3.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	47

3.4.1.	Textura	47
3.4.2.	Densidad real	48
3.4.3.	Densidad aparente	49
3.4.4.	Porosidad total.....	52
3.4.5.	Capacidad de campo.....	54
3.4.6.	Punto de marchitez permanente.....	56
3.4.7.	Humedad aprovechable	57
3.4.8.	Estabilidad de agregados	59
3.4.9.	Conductividad hidráulica saturada.....	61
3.4.10.	Comparación entre factores de estudio.....	64
3.5.	CONCLUSIONES	65
3.6.	REFERENCIAS	66
4.	EFFECTO DE TRES SISTEMAS DE PRODUCCIÓN SOBRE EL ESTADO DE LA FERTILIDAD QUÍMICA DEL SUELO	71
4.1.	RESUMEN/ABSTRACT	71
4.2.	INTRODUCCIÓN	72
4.3.	MATERIALES Y MÉTODOS	74
4.3.1.	Área de estudio	74
4.3.2.	Muestreo de suelos y análisis de laboratorio.....	76
4.3.3.	Análisis estadístico	77
4.4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	78
4.4.1.	Normalidad de datos y homogeneidad de varianzas.....	78
4.4.2.	Análisis de varianza.....	80
4.4.3.	Valores medios, convenientes y prueba de Tukey	82
4.4.3.1.	Materia orgánica y carbono orgánico	82
4.4.3.2.	pH y pH-KCl	83
4.4.3.3.	Nitrógeno total.....	85
4.4.3.4.	Nitratos.....	87
4.4.3.5.	Nitrógeno inorgánico y amonio.....	87

4.4.3.6.	Relación C-N.....	89
4.4.3.7.	Potasio y magnesio.....	90
4.4.3.8.	Calcio.....	92
4.4.3.9.	Capacidad de intercambio catiónico y acidez intercambiable.....	93
4.4.3.10.	Fósforo aprovechable.....	95
4.4.3.11.	Micronutrientes.....	96
4.4.3.12.	Conductividad eléctrica.....	98
4.4.3.13.	Comparación entre factores de estudio.....	99
4.5.	CONCLUSIONES	102
4.6.	REFERENCIAS	103

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Características de los sistemas de uso de suelo elegidos	45
Cuadro 2. Valores medios para la densidad aparente (D_{ap}) estudiada en los distintos SUS y PM	51
Cuadro 3. Valores medios y prueba de Tukey para la PT estudiada en los distintos SUS y PM	53
Cuadro 4. Valores medios y prueba de Tukey para la CC estudiada en los distintos SUS y PM	55
Cuadro 5. Valores medios y prueba de Tukey para el PMP estudiado en los distintos SUS y PM	57
Cuadro 6. Valores medios y prueba de Tukey para la HA estudiado en los distintos SUS y PM	59
Cuadro 7. Valores medios y prueba de Tukey para la EA estudiada en los distintos SUS y PM	61
Cuadro 8. Valores medios y prueba de Tukey para la K_s estudiada en los distintos SUS y PM	63
Cuadro 9. Valores medios de las variables físicas para los distintos SUS y PM en los diferentes tipos de muestro para su comparación desde el punto de vista agronómico	65
Cuadro 10. Características de los sistemas de uso de suelo elegidos	76
Cuadro 11. Pruebas de normalidad de datos y homogeneidad de varianzas para las variables de estudio	79
Cuadro 12. Resultados del análisis de varianza (ANDEVA) para las variables estudiadas	81
Cuadro 13. Valores medios, prueba de Tukey y valores más convenientes para materia orgánica (MO) y carbono orgánico (Corg).....	83
Cuadro 14. Valores medios, prueba de Tukey y valores más convenientes para las variables pH y pH-KCl	85
Cuadro 15. Valores medios y más convenientes para nitrógeno total (N_{total})....	86
Cuadro 16. Valores medios, prueba de Tukey y valores más convenientes para nitrato ($N_{nitrato}$)	87

Cuadro 17. Valores medios, prueba de Tukey (solo en la MS) y valores más convenientes para amonio (N_{amonio}) y nitrógeno inorgánico (N_{inorg}).....	89
Cuadro 18. Valores medios, prueba de Tukey y valores más convenientes para C-N	90
Cuadro 19. Valores medios, prueba de Tukey y valores más convenientes para potasio (K_{int}) y magnesio (Mg_{int}) intercambiables.....	92
Cuadro 20. Valores medios, prueba de Tukey (solo para la MS) y valores más convenientes para calcio (Ca_{int}) intercambiable.....	93
Cuadro 21. Valores medios, prueba de Tukey y valores más convenientes para capacidad de intercambio catiónico (CIC) y acidez intercambiable (acidez)	94
Cuadro 22. Valores medios, prueba de Tukey y valores más convenientes para fósforo (P) aprovechable.....	96
Cuadro 23. Valores medios, prueba de Tukey y valores más convenientes para hierro (Fe), cobre (Cu), zinc (Zn), manganeso (Mn) y boro (B).....	98
Cuadro 24. Valores medios y prueba de Tukey para la variable conductividad eléctrica (CE)	99
Cuadro 25. Valores medios de las variables químicas para los distintos SUS y PM en los diferentes tipos de muestro para su comparación desde el punto de vista agronómico.....	101

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. (a) Pastizal inducido de *Brachiaria brizantha* Stapf cv. Marandú destinado para la alimentación de ganado bovino, (b) y (c) cultivo de limón persa (*Citrus latifolia* Tan.) para exportación, (d) y (e) plantación forestal de *Hevea brasiliensis* Muell. Arg. para la extracción de hule 44
- Figura 2. Valores medios de los porcentajes (%) de arenas, limos y arcillas para cada uno de los SUS y PM. C: franca, CR: franco arcillosa, CRA: franco arcillo arenosa, SA: sistema agrícola, SF: sistema forestal, SP: sistema pastizal, PM1: profundidad de 0 a 10 cm, PM2: profundidad de 10 a 20 cm, MS: muestra simple y MC: muestra compuesta 47
- Figura 3. Valores medios para la D_r (Mg m^{-3}) en los SUS y las dos PM. SA: sistema agrícola, SF: sistema forestal, SP: sistema pastizal, PM1: profundidad de 0 a 10 cm, PM2: profundidad de 10 a 20 cm, MS: muestra simple y MC: muestra compuesta 49
- Figura 4. (a) Pastizal inducido de *Brachiaria brizantha* Stapf cv. Marandú destinado para la alimentación de ganado bovino, (b) y (c) cultivo de limón persa (*Citrus latifolia* Tan.) para exportación, (d) y (e) plantación forestal de *Hevea brasiliensis* Muell. Arg. para la extracción de hule 75

ABREVIATURAS USADAS

e. g.: por ejemplo

et al.: y otros

DEDICATORIAS

A mis padres:

Manuel Nuñez Florest† y María Luisa Peñaloza Pérez

Gracias por darme la vida y por brindarme siempre cariño, apoyo y comprensión, aun teniendo obstáculos en el camino pude salir adelante y no les fallé. Con todo mi amor y respeto.

A mis hermanos:

Sergio

Omar

José Manuel

Rafael

Miguel Ángel

Por estar siempre apoyándome, por ser los mejores y por ser parte de esta familia que Dios me regaló. Gracias por sus consejos.

A mis sobrinos, sobrinas, primos, primas, tíos, tías y a todos los que forman parte de mi familia. Con mucho cariño.

A Betsabé Uriarte Medina, tu afecto y tu cariño son los detonantes de mi felicidad.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por ser la luz en mi camino y darme fortaleza en todo momento.

A la Universidad Autónoma Chapingo, porque en sus aulas y de la mano de sus docentes aprendí a desarrollarme como un ingeniero exitoso.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada para la realización de esta investigación.

Al Dr. David Cristóbal Acevedo por sus consejos y asesoría en la elaboración del presente trabajo.

A la Dra. Elizabeth Hernández Acosta por su apoyo y comentarios en la elaboración del presente trabajo.

Al Dr. Antonio Villanueva Morales por su apoyo y asesoría en la parte estadística del presente trabajo.

A mis compañeros, por compartir momentos tan agradables y placenteros en nuestra alma máter.

A todas aquellas personas que no se mencionan, pero que de una u otra forma contribuyeron en mi formación profesional, aprovecho para darles las gracias y que siempre los recordaré.

DATOS BIBLIOGRÁFICOS

Nombre: Jorge Luis Nuñez Peñaloza

Fecha de nacimiento: 06 de mayo de 1992

Lugar de nacimiento: General Felipe Ángeles, San Juan Mazatlán, Oaxaca

CURP: NUPJ920506HOCXXR04

No. celular: 463 106 3970

e-mail: agronunez@yahoo.com

Profesión: Ingeniero Agrónomo especialista en Suelos

Cédula profesional: 10650053

DESARROLLO ACADÉMICO

Preparatoria: Preparatoria Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo (UACH)

Licenciatura: Ingeniero Agrónomo especialista en Suelos, Departamento de Suelos, UACH.

RESUMEN GENERAL

ESTADO DE LA FERTILIDAD DEL SUELO EN TRES SISTEMAS DE PRODUCCIÓN: FORESTAL, AGRÍCOLA Y PASTIZAL¹

La fertilidad física y química del suelo es fundamental para una producción óptima. Los sistemas de uso del suelo pueden modificar de manera positiva o negativa a estos tipos de fertilidad. Los objetivos de este estudio fueron determinar la influencia de los sistemas agrícola (SA), forestal (SF) y pastizal (SP) sobre las propiedades físicas y químicas de un suelo tropical y ver si el tipo de muestreo incidía sobre el cumplimiento de los supuestos de normalidad de datos y homocedasticidad de varianzas de las variables físicas y químicas, así como en la determinación de la significancia de los efectos de los sistemas. Para cumplir los objetivos se realizó un muestreo de suelo a las profundidades de 0 a 10 y 10 a 20 cm obteniéndose 48 muestras de suelo 24 simples y 24 compuestas. Las determinaciones realizadas fueron textura, D_r , D_{ap} , CC, PMP, HA, EA, PT, K_s , pH, pH-KCl, MO, C_{org} , nitrógeno (total, inorgánico, amonio y nitrato), relación C-N, P, K, Ca y Mg intercambiables, CIC, acidez intercambiable, Fe, Cu, Zn, Mn, B y CE. Los resultados mostraron que para ambos tipos de muestreo el SF evidenció una mayor D_{ap} , concentración de nitrógeno (inorgánico, amonio y nitrato), Ca y Mg, una menor PT, CC, PMP y HA. Por su parte, el SP evidenció una mayor CC, PMP, HA, EA, concentración de MO, C_{org} , N total, Zn, y un valor mayor de pH y menor de acidez intercambiable. El SA propició valores intermedios respecto a estas variables. La PM de 0 a 10 cm evidenció valores mayores para la mayoría de las variables. Para las propiedades físicas, en ambos tipos de muestreo, el SP resultó ser el mejor al tener una mayor cantidad de valores convenientes de las variables. Para las propiedades químicas, el SP y SF resultaron ser los mejores sistemas para el MS y el MC respectivamente, al tener una mayor cantidad de valores convenientes de las variables. El tipo de muestreo afectó a los valores medios obtenidos para todas las variables. Para las propiedades físicas, la mayoría de las variables cumplieron con los supuestos de normalidad y homocedasticidad de varianzas a excepción de la D_{ap} , PT y K_s . Para las variables químicas, las que cumplieron con los supuestos de normalidad y homocedasticidad de varianzas para ambos tipos de muestras fueron MO, C_{org} , N (total y amonio), K_{int} , Mg_{int} , B y pH-KCl.

Palabras clave: agrícola, fertilidad, hule, pastizal, propiedades fisicoquímicas

¹Tesis de Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo

Autor: Jorge Luis Nuñez Peñaloza

Director de Tesis: Dr. David Cristóbal Acevedo

GENERAL ABSTRACT

STATE OF SOIL FERTILITY IN THREE PRODUCTION SYSTEMS: FORESTRY, AGRICULTURAL AND GRASSLAND²

The physical and chemical fertility of the soil is essential for optimal production. Land use systems can positively or negatively modify these types of fertility. The objectives of this study were to determine the influence of agricultural (AS), forestry (FS) and grassland (GS) systems on the physical and chemical properties of a tropical soil and see if the type of sampling affected compliance with assumptions of normality of data and homocedasticity of the variances of the physical and chemical variables, as well as in the significance of the importance of the effects of the systems. To meet the objectives, soil sampling was carried out at depths of 0 to 10 and 10 to 20 cm, obtaining 48 samples, 24 simple (SS) and 24 composite (CS). The determinations made were texture, D_p , D_b , FC, PWP, WHC, AE, TP, K_s , pH, pH-KCl, OM, C_{org} , nitrogen (total, inorganic, ammonium and nitrate), ratio C-N, P, exchangeable K, Ca and Mg, CEC, exchangeable acidity, Fe, Cu, Zn, Mn, B and EC. The results showed that for both types of sampling, the FS showed a higher D_b , nitrogen (inorganic, ammonium and nitrate), Ca and Mg, a lower TP, FC, PWP and WHC. For its part, the GS showed a higher FC, PWP, WHC, AE, OM, C_{org} , total N, Zn, and a higher pH value and lower exchangeable acidity. The AS provided intermediate values with respect to these variables. The depth of 0 to 10 cm showed higher values for most of the variables. For physical properties, in both types of sampling, the GS proved to be the best because it had a greater number of convenient values of the variables. For the chemical properties, the GS and the FS proved to be the best systems for the SS and the CS, respectively, having a greater amount of convenient values of the variables. The type of sampling affected the average values obtained for all the variables. For the physical properties, most of the variables complied with the assumptions of normality and homocedasticity of the variances, except for D_b , TP and K_s . For the chemical variables, those that met the assumptions of normality and homocedasticity of the variances for both types of samples were OM, C_{org} , nitrogen (total and ammonium), K, Mg, B and pH-KCl.

Keywords: agricultural, fertility, rubber, grassland, physicochemical properties

²Thesis Master's Degree in Forestry Sciences, Universidad Autónoma Chapingo

Author: Jorge Luis Nuñez Peñaloza

Thesis advisor: Dr. David Cristóbal Acevedo

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

En México han venido ocurriendo cambios importantes en el manejo del suelo en los últimos años debido a un aumento en la población y la demanda que esta ejerce por recursos alimenticios. Los suelos con un uso forestal son convertidos rápidamente a uso agrícola o pastizal, para generar los alimentos que la población demanda. Esta conversión a usos más intensivos puede causar cambios importantes en las propiedades físicas y químicas del suelo y también, puede afectar su fertilidad, aumentando la erosión o la compactación de éste. Por ejemplo, el efecto de la conversión de uso forestal a uso de pastizal sobre la materia orgánica del suelo es variable, en algunos casos se ha informado un aumento para ciertos lugares y una disminución en otros (Geissen et al., 2009).

La conversión de suelos con uso forestal a uso agrícola o pastizal se asocia muy a menudo con la degradación del suelo. Cerca del 44.9% de los suelos del país se encuentran afectados por algún proceso actual de degradación. La degradación química ocupa el primer lugar en extensión con alrededor de 34 millones de ha (17.9% del territorio nacional) y se presenta en prácticamente todas las entidades del país, aunque con diferencias importantes. La disminución de la fertilidad es el principal tipo de degradación química, cubriendo el 92.7 % de la superficie afectada por degradación química en el país. La degradación física es el proceso de degradación menos extendido en el país, ya que afecta alrededor del 6 % de la superficie nacional, sin embargo, tiene un alto impacto debido a que prácticamente es irreversible y conlleva a la pérdida de la función productiva del suelo (SEMARNAT, 2016b).

En un esfuerzo por recuperar la fertilidad de los suelos, reducir la erosión o servir como sumideros de dióxido de carbono, se ha optado por establecer plantaciones de especies forestales en suelos sometidos a uso agrícola o uso de pastizal (Boley, Drew, & Andrus, 2009).

El ejido de General Felipe Ángeles, municipio de San Juan Mazatlán tiene una extensión de 5,466 hectáreas y se ubica al noreste del estado de Oaxaca (Registro Agrario Nacional, 2019). En los últimos años este ejido ha aumentado

su superficie dedicada a actividades agrícolas, dando paso a la siembra de cultivos intensivos como maíz, limón, naranja, pastizales inducidos y hule (SIAP, 2019). Año tras año, áreas con vegetación natural son desmontadas para ampliar la frontera agrícola y ganadera, modificando las propiedades físicas y químicas del suelo en esta región, lo que probablemente lleve al deterioro paulatino de la fertilidad en este suelo, provocando un aumento en el uso de fertilizantes, plaguicidas y el consecuente abandono de los terrenos.

Teniendo a lo anterior como un panorama general de lo que sucede en este ejido, se hace necesario conocer en una primera instancia la condición actual de las propiedades físicas y químicas del suelo en diferentes sistemas de uso y a diferentes profundidades, con la finalidad de tomar decisiones que conduzcan a la mejora de las condiciones actuales del recurso suelo.

El objetivo de este estudio fue medir las propiedades físicas y químicas de un suelo con los usos agrícola, forestal y de pastizal a dos profundidades para: a) determinar el efecto de los usos y las profundidades sobre las propiedades físicas y químicas de un suelo tropical, b) determinar si dos métodos de muestreo, simple y compuesto, inciden sobre el cumplimiento de los supuestos de normalidad de datos y homocedasticidad de varianzas de las variables físicas y químicas, c) determinar si el método de muestreo incide en la determinación de la significancia de los efectos de los sistemas de uso de suelo y las profundidades y d) determinar cuál sistema de uso de suelo presenta los valores más convenientes de las variables físicas y químicas desde el punto de vista agronómico.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. El concepto de suelo

En la Tierra, los suelos se forman gracias a la acción combinada de al menos cinco factores: material parental, clima, topografía, biota y tiempo (Certini & Scalenghe, 2010). Inicialmente es a través de la desintegración y descomposición de las rocas por procesos físicos y químicos, influenciado por la actividad y la acumulación de residuos de numerosas plantas y animales macro y microscópicos, esto no lo hace ser una entidad homogénea sino un cuerpo variable con múltiples atributos (Hillel, 1998). Los suelos suelen estar formados por diferentes horizontes, cada uno con propiedades muy variables (Vanwalleghem et al., 2017).

Como un primer acercamiento al estudio del suelo es necesario tener su definición. Una definición de suelo es “cualquier material dentro de los 2 m de la superficie de la Tierra que esté en contacto con la atmósfera con exclusión de los organismos vivos, las zonas con hielo continuo no cubiertas por otro material y las masas de agua más profundas de 2 m” (IUSS Working-Group WRB, 2015). Otra definición de suelo es la hecha en la Soil Taxonomy donde es definido como “un cuerpo natural que comprende a sólidos (minerales y materia orgánica), líquidos y gases que ocurren en la superficie de las tierras, que ocupa un espacio y se caracteriza por tener lo siguiente: horizontes o capas, que se distinguen de la material original como resultado de adiciones, pérdidas, transferencias y transformaciones de energía y materia o por la habilidad la soportar plantas en un ambiente natural” (Soil Survey Staff, 2014). Podemos entender estas definiciones considerando al suelo como un cuerpo natural, dinámico, vivo, que desempeña un papel esencial como fundamento de los ecosistemas terrestres y de la vida humana, por lo que es un componente crítico de la biosfera (Álvarez-Solís, Mendoza-Vega, & Pool-Novelo, 2015; Porta, López-Acevedo, & M. Poch, 2014). El suelo es un sistema que consta de cuatro grandes componentes: materias minerales (45%), materia orgánica (5%), agua (25%) y aire (25%), estando íntimamente mezclados, haciendo su separación muy difícil (O. Buckman & C. Brady, 1982).

Otra definición reciente de suelo pretende tener un alcance casi universal: “suelo es una capa de centímetros o más gruesa, no consolidada, de material mineral u orgánico de grano fino, con o sin materiales (o elementos) gruesos, partes cementadas, que se encuentra en la superficie (o cerca de ella) de planetas, lunas y asteroides, mostrando una clara evidencia de intemperismo químico” (Certini & Ugolini, 2013).

2.2. Suelo superficial y subsuperficial

El suelo superficial se refiere a la capa arable y puede ser de unos 10 hasta 30 cm de espesor, por su parte, el subsuelo es la capa subyacente que puede ir de los 20 o 30 cm inferiores siguientes. El suelo superficial es la zona dónde se desarrolla el mayor número de raíces, contiene muchos de los nutrientes esenciales para las plantas y abastece a los cultivos con el mayor volumen de agua que necesitan. Los horizontes superficiales del suelo generalmente son más ricos en nutrientes y tienen una mayor capacidad de retención de agua. Por ser esta una zona muy activa, es la que se muestrea en estudios de fertilidad de suelos (H. Tam, 1996; Ortiz-Villanueva & Ortiz-Solorio, 1990; Vanwalleghem et al., 2017).

2.3. Fertilidad del suelo

La fertilidad de un suelo es el estado del suelo creado por las complejas interacciones de las propiedades físicas, químicas y biológicas (Osman, 2013b). Este término no da suficiente información sobre la condición de este recurso, si no se describen los calificadores “físicos”, “químicos” y “biológicos” (Abbot & Murphy, 2007).

2.4. Propiedades físicas del suelo

Las propiedades físicas del suelo proporcionan información relacionada con el movimiento del agua y del aire a través del suelo, así como también las condiciones que afectan la germinación, el crecimiento de las raíces y los procesos de erosión (Singh, Cowie, & Chan, 2011). Las propiedades físicas más importantes del suelo son las siguientes: granulometría, porosidad, densidad aparente, densidad real y capacidad de retención de agua disponible para las plantas (Porta et al., 2014). Estas propiedades pueden ser estudiadas en laboratorio, donde la granulometría consiste en realizar un análisis mecánico para determinar la distribución de los tamaños de partículas en una muestra de suelo, la porosidad es un índice del espacio poroso relativo en un suelo, la masa de un volumen dado de suelo puede ser expresado en términos de densidad aparente y densidad real y la capacidad de retención de agua disponible para las plantas como la cantidad de agua retenida por el suelo entre las constantes de humedad capacidad de campo y punto de marchitez permanente (H. Tam, 1996; Hillel, 1998). Una mejor condición de estas propiedades proporcionarán condiciones físicas que respalden la productividad, la reproducción y la calidad de las plantas (consideradas en términos de bienestar humano y animal) sin provocar la pérdida de la estructura o erosión del suelo y el apoyo a los procesos biológicos y químicos del suelo (Abbot & Murphy, 2007).

2.5. Estudios de propiedades físicas de suelos en distintos sistemas de manejo

Geissert, Ramírez, y Meza Pérez (2000) al analizar y comparar las propiedades físicas del horizonte superficial (0-30 cm) en un Andosol cercano al volcán Cofre de Perote, con un manejo forestal y un manejo agrícola de 40 años, encontraron diferencias en el contenido de humedad, densidad aparente, porosidad y granulometría; siendo mejores estas características en el manejo forestal.

Sustaita-Rivera, Ordaz-Chaparro, Ortiz-Solorio, y de León-González (2000) al analizar dos tipos de suelos (Fluvisol éutrico y Regosol éutrico) en Zacatecas con

diferentes manejos, encontraron propiedades físicas más favorables en los suelos con vegetación natural, seguido del manejo con sistema de labranza con tracción animal, por lo que, consideraron que estos dos tipos de manejo provocan menor degradación del recurso suelo.

Medina-Méndez et al. (2014) evaluaron en un período de 30 años cambios en las propiedades físicas de un Luvisol en Campeche con un sistema de manejo maíz bajo temporal (SMT), sistema de manejo mango bajo riego (SMR) y selva mediana subperennifolia (SVN). En este estudio encontraron diferencias en densidad real cuando se comparó SMT y SVN; diferencias en densidad real, porosidad total y humedad aprovechable cuando se comparó SMR y SVN.

Murray, Orozco, Hernandez, Lemus, y Najera (2014) evaluaron en un período de ocho años los cambios en las propiedades físicas de un suelo Cambisol vértico flúvico en Nayarit en el establecimiento de un sistema agroforestal. Encontraron diferencias en el valor de densidad aparente, porosidad total, capacidad de campo y velocidad de infiltración al comparar los valores del 2005 y del 2012.

Rodríguez, Cristóbal, Álvarez, y Uribe (2016) evaluaron dos sistemas de manejo, agroforestal y monocultivo en Texcoco, México. Encontraron diferencias en capacidad de campo, punto de marchitez permanente, conductividad hidráulica y humedad aprovechable. El sistema de manejo agroforestal presentó menores valores de las constantes de humedad y un valor mayor de conductividad hidráulica.

Fernández, Acevedo, Villanueva, y Uribe (2016) estudiaron dos sistemas agroforestales, un monocultivo de café y un bosque de niebla en suelos Cambisol y Luvisol de Veracruz. Respecto al monocultivo, los suelos de los sistemas agroforestales y del bosque de niebla evidenciaron una disminución de la densidad aparente, un aumento de la capacidad de campo y del punto de marchitez permanente. La humedad aprovechable fue alta en todos los sistemas.

Hernández, Gutiérrez, Ortiz-Solorio, Sánchez, y Ángeles (2017) evaluaron tres sistemas de manejo, forestal, agroforestal y agrícola en un Andosol en Puebla, México. Los resultados obtenidos dan a conocer que el suelo en el manejo forestal presenta una mayor capacidad de retención de humedad y menor densidad aparente. El manejo agrícola presenta una menor capacidad de retención de humedad y mayor densidad aparente. El manejo agroforestal presentó valores intermedios.

2.6. Propiedades químicas del suelo

Los parámetros químicos del suelo son importantes porque pueden ser usados para evaluar la habilidad del suelo de suministrar nutrientes y amortiguar cambios químicos (Mi et al., 2018). Algunas propiedades importantes del comportamiento químico de todos los suelos son, pH, capacidad de intercambio iónico, porcentaje de saturación de bases, porcentaje de sodio intercambiable, conductividad eléctrica y el potencial redox. La materia orgánica del suelo tiene una influencia sobre algunos de los índices descritos anteriores, como pH, capacidad de intercambio iónico y el potencial redox, por lo que estos índices no se entenderían sin la materia orgánica, aun cuando esta es muy baja (< 5%) en suelos minerales (Osman, 2013a).

En los suelos existen sólidos inorgánicos y orgánicos, solutos, líquidos y gases. Los principales cationes y aniones (solutos) presentes en la solución del suelo son Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , NH_4^+ , Al^{3+} , Fe^{3+} , Mn^{2+} (otros iones metálicos trazas) y H_2PO_4^- , SO_4^- , PO_4^{3-} , CO_3^{2-} , HCO_3^- , NO_3^- , Cl^- , entre otros (Osman, 2013a). La mayoría de estas formas solubles son utilizadas por la plantas para su desarrollo, ya sea como nutrientes primarios, secundarios o micronutrientes (Mitra, 2017). El carbono orgánico del suelo es un atributo clave de la fertilidad del suelo, altos niveles de este parámetro indican alta capacidad de sorción, capacidad de intercambio catiónico y mayor disponibilidad de nutrientes (Mi et al., 2018).

2.7. Estudios de propiedades químicas de suelos en distintos sistemas de manejo

Lal (1996) evaluó a lo largo de cinco años (1982-1986) durante la estación seca, un conjunto de propiedades químicas en un suelo Alfisol en el oeste de África, encontró que la calidad química del suelo, medida a través de sus propiedades, decrece al paso de tiempo a una tasa de 0.23 unidades por año para pH, 0.05 % por año para carbono orgánico, 0.012 % por año para nitrógeno total

Hajabbasi, Jalalian, y Karimzadeh (1997) concluyeron para suelos de la región de Lordegan, Irán, que la deforestación (de vegetación predominante de *Quercus brontii* a tierras de cultivo con trigo y cebada) disminuye en un 50 % el contenido de materia orgánica y nitrógeno Kjeldahl, y en un intervalo del 10 al 15 % el contenido de iones solubles (cationes intercambiables, cloruros y bicarbonatos), resultando en una baja fertilidad química y disminuyendo la productividad natural de los suelos de la región.

Geissert et al. (2000) hallaron que después de un período cercano a los 50 años de uso, un suelo forestal convertido a suelo agrícola (Andosol) disminuye su contenido de carbono orgánico de 9.3 a 4.9 %, el nitrógeno Kjeldahl de 0.46 a 0.39 %, una disminución en el contenido de K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} , y la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE) se reduce de 13.0 a 7.9 cmol (+) kg^{-1} . Esta disminución ocasiona importantes cambios edáficos, pero sin cambiar mucho la calidad del suelo por la inicialmente elevada cantidad de carbono orgánico, nitrógeno Kjeldahl y CICE.

Braimoh y Vlek (2004) realizaron un estudio en suelos de una región ecológica de Ghana conocida como la sabana de guinea. Estos dos investigadores encontraron diferencias significativas cuando compararon suelos con vegetación natural y suelos con cultivos permanentes en los siguientes atributos: carbono orgánico, nitrógeno Kjeldahl, fósforo disponible, calcio y magnesio

intercambiables, y la CICE; y diferencias significativas cuando compararon suelos abiertos a cultivos recientemente y con cultivos permanentes en los siguientes atributos: carbono orgánico, nitrógeno total, calcio y magnesio intercambiables, y CICE. Además, comprobaron que el pH está fuertemente correlacionado con al menos 11 propiedades del suelo, el carbono orgánico con 10 propiedades del suelo al igual que la CICE. La disponibilidad de nutrientes depende fuertemente del pH y la MO es el almacén de nutrientes para las plantas. Este estudio sugiere que el cultivo continuo agota los nutrientes del suelo. Aunque existe una correlación entre el carbono orgánico del suelo y muchas propiedades, la correlación disminuye a medida que el cultivo se mantiene. Con la pérdida de la MO, quedan materiales que contribuyen poco a la fertilidad del suelo.

Vergara-Sánchez, Etchevers-Barra, y Vargas-Hernández (2004) encontraron en suelos sujetos a distintos usos en tres microcuencas de la Sierra Norte de Oaxaca, México (pertenecientes a la región Mazateca, Cuicateca y Mixe), que los porcentajes de C del suelo en las microcuencas, sistemas de uso de la tierra dentro de cada microcuenca y profundidades fueron significativamente diferentes. En este mismo sentido, Vergara-Sánchez, Etchevers-Barra, y Padilla-Cuevas (2005) concluyeron que la fertilidad de los suelos en pendientes pronunciadas (>30%) en las tres regiones, se encuentran en una condición de debilidad. Las bajas concentraciones de fósforo disponible, el bajo pH y elevada acidez intercambiable, y la baja saturación de bases fueron comunes en los suelos de las tres regiones. Estos suelos presentan serias restricciones químicas que limitan los rendimientos de los cultivos. Los problemas de fertilidad química fueron más acentuados en las regiones Mazateca y Mixe que en la Cuicateca.

Araujo et al. (2005) estudiando Ultisols en la región noreste de Brasil cercana a la Estación de Investigación Ecológica de Pau-Brasil en el estado de Bahía, encontraron que no existe diferencia significativa en el contenido de carbono orgánico en suelos con bosque natural y suelos con cultivos anuales, esto debido a que los agricultores conservan todos los residuos de las cosechas en el sitio,

incluidos los residuos del deshierbe manual, lo anterior y la cero labranza explican porque no hay diferencia significativa.

Khresat, Al-Bakri, y Al-Tahhan (2008) estudiaron en la región de Aljoun, en el noroeste de Jordania, el comportamiento de seis propiedades químicas del suelo, en relación con un manejo forestal (con varias especies del género *Quercus*, *Pistachio atlantica* y *Pinus halepensis*) y un manejo agrícola (con cultivos de trigo y cebada principalmente). Encontraron diferencia significativa en los siguientes atributos: pH, capacidad de intercambio catiónico, MO y fósforo disponible. Estas diferencias arrojan que los suelos cultivados exhiben un estado de deterioro en las propiedades químicas del suelo en comparación con los suelos forestales. Esto sugiere que los cultivos intensivos son los principales responsables del deterioro en la calidad del suelo en esta área de estudio.

Bugarín et al. (2010) concluyeron para el estado de Nayarit en un suelo Cambisol, que los sistemas silvopastoriles, en específico los que presentan altas densidades de especies forrajeras modifican el pH, y a un corto plazo la MO del suelo. El impacto de esos cambios está influido por la edad del sistema, las especies implantadas y el manejo del sistema; los cambios más característicos se aprecian en sistemas que tienen más tiempo de establecidos.

Haghighi, Gorji, y Shorafa (2010) en un estudio realizado en la cuenca de Taleghan ubicada en la provincia de Tehran, Irán en suelos calcáreos encontraron que no existe diferencia significativa en dos sitios con dos manejos distintos pastizal natural y agricultura de secano (50 años de manejo) en pH y conductividad eléctrica; pero si para el contenido de MO, donde el contenido es mayor en el sitio con manejo de pastizal natural.

Biro, Pradhan, Buchroithner, y Makeschin (2013) hallaron en el estado de Gadarif al este de Sudán varias coberturas de suelo: bosque, agrícola, y acahual en dónde estudiaron varias propiedades químicas del suelo y encontraron que hay

un aumento significativo del pH en suelos cultivados, el contenido de materia orgánica y la conductividad eléctrica fueron mayores en suelos de acahual y menores en suelos cultivados, finalmente, el contenido de fósforo y potasio fue mayor en el acahual en comparación con los otros dos manejos.

Zhang, Sparrow, van Veldhuizen, y Masiak (2012) en la región del estado de Alaska, USA conocida como Delta Junction, estudiaron las propiedades físicas y químicas de un suelo sometido a dos tipos de manejo: agrícola y pastizal; tomando como testigo al manejo forestal. Encontraron que existe diferencias significativas en varias propiedades químicas como: materia orgánica, nitrógeno Kjeldahl y mineral, fósforo total, capacidad de intercambio catiónico, fósforo extractable, bases intercambiables exceptuando al sodio, Zn, Fe y Mn. Esta diferencia significativa estuvo a favor del uso de suelo agrícola y pastizal, lo que contradice a lo que sucede en regiones más tropicales, esto debido principalmente a la falta de grandes actividades de fauna en el suelo de del manejo forestal (existía permafrost), resultando en una menor mezcla de la materia orgánica del suelo superficial con el suelo mineral.

Murray et al. (2014) encontraron en Nayarit, México que un sistema agroforestal conformado por diversos árboles de clima cálido subhúmedo y varias especies arbustivas a ocho años de implementado mostró un aumento del 85% de la materia orgánica del suelo.

Palma-López, Salgado-García, Martínez, Zavala-Cruz, y Lagunes-Espinoza (2015) evaluaron tres sistemas de manejo, una plantación forestal de eucalipto con diferentes edades, un pastizal natural y un sitio de vegetación secundaria (acahual) en un suelo Acrisol en Tabasco, México. Encontraron que las plantaciones de eucalipto, acahual y pastizal natural conservan la MO del suelo y que no existe diferencia en las propiedades químicas por el uso del sitio.

Fernández et al. (2016) hallaron que los suelos de Bosque presentan mejores condiciones de fertilidad química, seguido de los sistemas agroforestales y finalmente del monocultivo, ya que este último, favoreció a una disminución de la concentración de MO.

Rodríguez et al. (2016) demostraron que el manejo agroforestal a pesar de influir más en la conservación del suelo tiende a reducir los rendimientos de los cultivos a los que se asocian los árboles, probablemente por el efecto negativo de la sombra, como se observó en Texcoco, México.

Por su parte, Estrada-Herrera et al. (2017) en la Mixteca Alta Oaxaqueña (MAO) para suelos Leptosoles, Phaeozem y Regosoles encontraron niveles moderados de degradación, siendo los indicadores de MO, fósforo extractable, potasio y magnesio intercambiable los que definieron más cercanamente el estado actual de la fertilidad química de los suelos de la MAO y que evidencian su degradación.

Hernández et al. (2017) encontraron que los Andosols con vegetación de bosque mesófilo de montaña presentan alto contenido de MO, en comparación con sistemas agroforestales y agrícolas. Además de que, los índices de calidad de suelo que mejor caracterizan el estado actual de la fertilidad química son MO, nitrógeno Kjeldahl y fósforo soluble.

Gmach et al. (2018) para la región de Uruçuí, ubicada al noreste de Brasil, en un suelo Ferralsol, encontraron contenidos de carbono en el suelo con diferencia significativa con valores más altos en la parte superior del suelo y disminuyendo con la profundidad. Así, el manejo con vegetación natural obtuvo el valor más alto de carbono orgánico junto con el manejo de pastizal, el valor más bajo lo tuvo el manejo con una plantación de *Eucalyptus urophylla*. Esto se explica como resultado de la presencia continua de residuos de plantas y al mayor tiempo que pasa el suelo sin ser perturbado.

2.8. Propiedades biológicas

Estas integran una gran cantidad de factores que afectan al suelo, entre ellos la abundancia y subproductos de micro y macroorganismos. Incluye funciones como la tasa de respiración, ergosterol y otros subproductos de los hongos, tasa de descomposición de los residuos vegetales, N y C de la biomasa microbiana. Como esta última es mucho más sensible al cambio que el C total, se ha propuesto la relación $C_{\text{microbiano}}:C_{\text{orgánico}}$ del suelo para detectar cambios tempranos en la materia orgánica.

2.9. Estudios de propiedades biológicas de suelos en distintos sistemas de manejo

Paz-Ferreiro, Trasar-Cepeda, Leirós, Seoane, y Gil-Sotres (2007) en suelos Umbrisol y Gleysol ubicados al noroeste de España, encontraron sólo diferencias significativas para la respiración microbiana, mineralización neta de nitrógeno y el carbono lábil cuando compararon manejo de suelo en pastizal y manejo de suelo en bosque. La mayoría de las propiedades estudiadas no mostró diferencias cuándo se comparó con valores reportados para pastizales de otras zonas.

Pajares, Gallardo, Masciandaro, Ceccanti, y Etchevers (2011) en la cuenca de Atécuaro en Michoacán, México en un suelo Acrisol después de 4 años con distintos manejos agronómicos (convencional, convencional perfeccionado, orgánico y en barbecho) encontraron diferencias significativas en cuanto a la actividad de varias enzimas (ureasa, proteasa, β -glucosidasa y fosfatasa). La actividad de estas enzimas disminuyó fuertemente con un uso agronómico intensivo (sistemas convencionales y en barbecho) y se mejoró bajo un uso conservador (orgánico y perfeccionado). En el corto tiempo estas actividades enzimáticas, particularmente aquellas ligadas al complejo de humus estable

(especialmente β -glucosidasa y fosfatasa), fueron más sensibles a las prácticas agrícolas. La actividad de estas enzimas puede considerarse como un buen indicador de los cambios en el suelo.

Henríquez, Uribe, Valenciano, y Nogales (2014) en suelos (Ultisol e Inceptisol) de Costa Rica sometidos a distintos manejos agronómicos, encontró que la actividad de la deshidrogenasa, β -glucosidasa, fosfatasa aumentaron en el manejo con *Vochysia ferruginea*, banano y vainilla, y pimienta respectivamente, disminuyendo en *Elaeis guinensis*. La actividad de la ureasa fue mayor en suelos con *Xanthosoma sagittifolium*, pimienta y vainilla que en suelos con piña y *Elaeis guinensis*. Además, la fosfatasa se correlacionó con más variables del suelo al igual que la β -glucosidasa.

Estrada-Herrera et al. (2017) encontraron que los suelos de bosque tienen una mayor cantidad de C de la biomasa microbiana, en comparación con suelos degradados o agrícolas.

Maharjan, Sanaullah, Razavi, y Kuzyakov (2017) para un suelo Cambisol de Chitwan, Nepal encontraron para tres manejos distintos de suelo: agricultura orgánica, agricultura convencional y bosque, que el contenido de C y N de la biomasa microbiana en el suelo superficial (0-20 cm) fue mayor en la agricultura orgánica; en el manejo convencional y de bosque estos contenidos se comportaron de manera similar. En el subsuelo (20-100 cm) no hubo cambios debido al manejo. La actividad de la β -glucosidasa fue mayor en el manejo orgánico, al igual que la quitinasa, leucina aminopeptidasa, tirosina aminopeptidasa y sulfatasa. Finalmente, demostraron que las prácticas de uso y manejo de la tierra tienen efectos significativos sobre las propiedades microbianas en las capas superficiales, con efectos menores en el subsuelo.

Moghimian, Hosseini, Kooch, y Darki (2017) en suelos del norte de Irán (Alfisol según la clasificación del USDA) encontraron que en diferentes tipos de manejo de suelo/cobertura existe diferencia significativa en cuanto a varias propiedades

biológicas del suelo. Así la respiración microbiana del suelo y el nitrógeno de la biomasa microbiana fueron mayores en plantaciones de *Alnus subcordata* y bosque natural virgen. En estos mismos sitios se encontró mayor actividad de ureasa, fosfatasa ácida, invertasa y arisulfatasa del suelo. El carbono de la biomasa microbiana fue dos veces mayor en la plantación de *Sequoia sempervirens* y bosque natural virgen. Concluyen que la preservación de bosques naturales aumenta la calidad del suelo al igual que plantaciones con especies nativas.

Qi et al. (2018) para la estación de control de la desertificación de Xiaojihan, China, encontraron que, cambiar a manejos agrícolas intensivos (por ejemplo: maíz) en zonas con un pasado de desertificación que han sido recuperadas, trae consigo una disminución en el contenido de C y N de la biomasa microbiana, sin embargo, la fertilidad del suelo puede ser mejorada por estos manejos.

2.10. Conclusiones sobre estudios de propiedades físicas, químicas y biológicas en los suelos

Los estudios presentados muestran una clara evidencia del deterioro de los suelos debido principalmente a cambios en las propiedades intrínsecas. La mayoría concluye en que la conversión de ecosistemas naturales en sistemas agropecuarios (debido a la falta de oportunidades económicas ha resultado en un aumento constante en el desmonte de tierras para fines agrícolas y pecuarios) acelera la degradación del suelo, mostrando un precario estado de fertilidad en muchos manejos. Algunos autores señalan que sistemas agroforestales son una alternativa para encontrar mejores condiciones edáficas similares a los ecosistemas naturales y una mejor fertilidad que sistemas agropecuarios.

Varios estudios se han realizado en México sobre el monitoreo de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, la mayoría concentrados en el Eje Neovolcánico en zonas templadas, por lo que hace falta información sobre

el comportamiento de estas propiedades para la zona de trópicos húmedos ya que resulta poco conocida.

Muchos autores concluyen el manejo adecuado de suelos agrícolas (como empleo de abonos, residuos de cosechas y cero labranzas) puede favorecer en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo aumentando el potencial de producción.

2.11. Degradación del suelo

El término “degradación del suelo” puede definirse como una reducción en la productividad de las tierras o el suelo debido principalmente a la actividad humana³, como respuesta a múltiples factores ambientales y socioeconómicos.

Entre las principales actividades que inducen la degradación se encuentran los sistemas de producción agropecuaria. Se puede clasificar a la degradación de suelos en dos grandes categorías: por desplazamiento del material edáfico (hídrica y eólica) y por deterioro interno (química: pérdida de nutrientes, contaminación, acidificación y salinización; física: encostramiento, compactación y deterioro de la estructura; biológica: desequilibrio en la actividad de microorganismos) (Cotler, Cram, Martínez-Trinidad, & Quintanar, 2013; Gibbs & Salmon, 2015).

Se sabe desde hace miles de años, que el cambio en el uso del suelo ha provocado episodios catastróficos de degradación física, química y biológica del suelo en muchas áreas del planeta. En algunas regiones, los usos reales del suelo se desvían de los usos naturales, definidos como los usos que se recomiendan en función de la capacidad del suelo. En estas regiones, se dice que el uso del suelo entra en conflicto ambiental. En el último siglo se vienen

³ Muchas tierras con productividad natural baja también son consideradas como degradadas

manejando cerca de la mitad de la superficie de la Tierra, lo que ha llevado a una rápida evolución de las características básicas del suelo.

Los efectos de la degradación del suelo inducidos por el cambio de uso de suelo son difíciles de generalizar porque varían entre tipo de suelo, sistemas de manejo, tipo de plantas y clima. Se pueden relacionar con reducciones de materia orgánica y nutrientes intercambiables. Sin embargo, el costo global de la degradación del suelo con solo mirar a la agricultura se acerca a los \$ 500 mil millones de dólares estadounidenses por año (Maharjan et al., 2017; Pacheco, Sanches-Fernandes, Valle-Junior, Valera, & Pissarra, 2018; Qi et al., 2018; Vanwalleghem et al., 2017).

Existen en México cerca de 32 millones de ha con un uso de suelo agrícola⁴, cerca de 19 millones de ha con un uso de suelo pecuario⁵ (INEGI, 2016) y cerca de 138 millones de ha con comunidades vegetales naturales (CONAFOR, 2014).

Estos usos del suelo son soportados por 26 de los 32 órdenes de suelo que aparecen en la clasificación WRB (World Reference Base for Soil Resource), siendo los Leptosoles los más abundantes, cubriendo el 28.3 % de la superficie del territorio nacional, seguido de los Regosoles que ocupan un 13.7 %. Los siguientes son los Phaeozems que ocupan 11.7 % del territorio, los Calcisoles con 10.4 %, Luvisoles con 9.1 % y los Vertisoles con 8.6 %. Los otros órdenes de suelo cubren áreas más pequeñas (Krasilnikov et al., 2013; SEMARNAT, 2016b). Estos seis órdenes de suelo ocupan en conjunto 81.8% del territorio. La pluralidad de suelos en México es lo que sustenta la gran biodiversidad con la que se cuenta.

⁴ Considerando los diferentes tipos de agricultura que se desarrollan tanto en zonas de temporal como en zonas de riego

⁵ Considerando pastizal inducido, cultivado y sabanoide

Por lo tanto, México puede ser catalogado como un país con amplia heterogeneidad en los órdenes de suelo, resultado de la diversidad de hábitats con diferentes factores de formación de suelo y la actividad de los procesos geomorfológicos (Krasilnikov et al., 2013).

El suelo es un recurso natural no renovable en la escala humana, por lo tanto, debe ser preservado y, en la medida de lo posible, su capacidad productiva y calidad debe ser mejorada (Pajares et al., 2011). La degradación del suelo, debido a un uso inadecuado, disminuye la productividad y aumenta la pérdida gradual de su fertilidad (Bugarín et al., 2010).

Alrededor del 77.4% de la superficie nacional degradada estaba asociada con actividades agrícolas y pecuarias (38.7% cada una de ellas); 16.4% a deforestación y remoción de la vegetación (SEMARNAT, 2016a)

La más reciente evaluación de la degradación del suelo en México mostró que alrededor del 44.9% de los suelos se encontraban afectados por algún proceso de degradación, siendo la degradación química la que ocupaba el primer lugar por extensión con cerca de 34 millones de ha que equivale al 17.8% del territorio nacional. La disminución de la fertilidad fue el tipo de degradación química más extendido cubriendo el 92.7% de la superficie afectada. Alrededor del 77.4% de la superficie nacional degradada estaba asociada con actividades agrícolas y pecuarias (38.7% cada una de ellas); 16.4% a deforestación y remoción de la vegetación (Cotler et al., 2013; SEMARNAT, 2016a).

El gobierno responde a esta situación legislando y estableciendo programas de políticas públicas, reflejado en once leyes sobre el suelo, seis considerando al suelo como sustrato y tres como fuente de productividad, mientras que en solo dos se introducen conceptos ambientales (Cotler et al., 2013, 2007).

2.12. Calidad del suelo

La calidad del suelo es uno de los tres componentes de la calidad ambiental. Calidad y salud de suelo son conceptos equivalentes, aunque no siempre considerados sinónimos. La calidad debe interpretarse como la utilidad del suelo para un propósito específico en una escala amplia. Es un concepto funcional, incluye variables que sirven para evaluar la condición del suelo, o de los indicadores de la calidad del suelo que ofrecen información sobre las propiedades, procesos y características del suelo. Estos indicadores pueden ser las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo o procesos que ocurren en el (Bünemann et al., 2018; Cruz, Barra, Castillo, & Gutiérrez, 2004; Estrada-Herrera et al., 2017).

La evaluación de la calidad del suelo permite un monitoreo constante de un área, identificar cambios en sus características y proponer prácticas adecuadas de manejo (Estrada-Herrera et al., 2017). Bünemann et al. (2018) propone que entre 6 y 8 indicadores son necesarios para evaluar la calidad de suelo, debido a que existen propiedades del suelo que, aunque son relevantes para el funcionamiento de este, en muchas ocasiones no muestran demasiada variación y, por lo tanto, no se incluyen en el conjunto de datos mínimo.

En México no existen muchos estudios a gran escala para conocer la distribución espacial de las propiedades del suelo. Un estudio muy importante es el presentado por Cruz-Cárdenas et al. (2014), donde a partir de 4400 muestras de suelo tomadas en territorio mexicano se evaluaron para cada muestra: Ca, K, Mg, Na, C_{orgánico}, materia orgánica, conductividad eléctrica, relación de absorción de sodio y pH; y mediante métodos geoestadísticos generaron una capa para cada propiedad del suelo y cinco clases para cada mapa de suelo. Así los suelos con un alto contenido de Ca y alta CE se encuentran principalmente en zonas áridas y semiáridas. Los suelos con un medio y ligeramente alto contenido de carbono (y MO) se distribuyeron en áreas donde hay una cubierta de vegetación. Los suelos con un alto contenido de K se encontraron en las zonas áridas. En

contraste, la concentración de Mg no mostró un patrón de distribución definido. La concentración de Na fue levemente baja y media en todo el país y no mostraron un patrón definido. Altas concentraciones se encontraron principalmente en los desiertos de Baja California y Chihuahua y en las llanuras costeras de Sinaloa y Sonora. En las zonas áridas se encontraron suelos con un pH ligeramente alto o suelos alcalinos, mientras que los suelos ácidos con un pH bajo se encontraron principalmente en bosques templados y tropicales. En general, los suelos mexicanos pueden clasificarse con un valor medio de la relación de absorción de sodio (RAS). Los suelos con alta RAS se encuentran principalmente en la península de Baja California. Cinco propiedades del suelo (Ca, EC, K, MO y pH) mostraron patrones de distribución que fueron determinados principalmente por dos factores que influyen en la formación del suelo: el clima y el material parental. En general, las propiedades del suelo evaluadas se clasificaron como levemente bajas y medianas.

Otros estudios han trabajado buscando indicadores de calidad de suelos en distintos sitios específicos con diferentes manejos y condiciones ambientales (Bautista-Cruz, Del Castillo, Etchevers-Barra, Gutiérrez-Castorena, & Baez, 2012; Estrada-Herrera et al., 2017; Hernández et al., 2017). Para áreas de bosque tropical montañoso sometidos a roza-tumba-quema de la sierra Norte del estado de Oaxaca, México se encontró que el carbono orgánico del suelo o materia orgánica, pH, P disponible, espesor del horizonte orgánico (O) y Al^{3+} intercambiable funcionan como indicadores de la calidad del suelo. En cambio, para la región de la mixteca alta en Oaxaca con áreas de bosque y agrícolas, los mejores indicadores de la calidad del suelo fueron: materia orgánica, P extractable, K y Mg. Para áreas dentro del Eje Neovolcánico se recomiendan como indicadores de la calidad del suelo: estructura del suelo, materia orgánica del suelo, $N_{kjeldahl}$, P y retención de humedad.

2.13. Referencias

- Abbot, L. K., & Murphy, D. V. (2007). *Soil Biological Fertility: A key to sustainable land use in agriculture* (L. K. Abbott & D. V. Murphy, Eds.). Dordrecht: Springer.
- Álvarez-Solís, J. D., Mendoza-Vega, J., & Pool-Novelo, L. (2015). Suelo y tierra: pautas para la vida. *Ecofronteras*, *19*, 2–5.
- Araujo, Q. R., Comerford, N. B., Ogram, A. V., Al-Agely, A., Filho, L. P. S., & Santos, J. G. (2005). Soil carbon and physical property changes in Brazilian Coastal Tableland soils with land use following deforestation. *Agroforestry Systems*, *63*(2), 193–198. <https://doi.org/10.1007/s10457-004-3198-7>
- Bautista-Cruz, A., Del Castillo, R. F., Etchevers-Barra, J. D., Gutiérrez-Castorena, M. del C., & Baez, A. (2012). Selection and interpretation of soil quality indicators for forest recovery after clearing of a tropical montane cloud forest in Mexico. *Forest Ecology and Management*, *277*, 74–80. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.04.013>
- Biro, K., Pradhan, B., Buchroithner, M., & Makeschin, F. (2013). Land Use/Land Cover Change Analysis And Its Impact On Soil Properties In The Northern Part Of Gadarif Region, Sudan. *Land Degradation and Development*, *24*(1), 90–102. <https://doi.org/10.1002/ldr.1116>
- Boley, J. D., Drew, A. P., & Andrus, R. E. (2009). Effects of active pasture, teak (*Tectona grandis*) and mixed native plantations on soil chemistry in Costa Rica. *Forest Ecology and Management*, *257*(11), 2254–2261. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.02.035>
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (1999). *The Nature and Properties of Soils* (12th ed.; P. Education, Ed.). New Jersey, USA.
- Braimoh, A. K., & Vlek, P. L. G. (2004). The impact of land-cover change on soil properties in northern Ghana. *Land Degradation & Development*, *15*(1), 65–74. <https://doi.org/10.1002/ldr.590>
- Bugarín, J., Bojórquez, J. I., Lemus, C., Murray, R. M., Hernández, A., Ontiveros, H., & Aguirre, J. (2010). Comportamiento de algunas propiedades físicoquímicas del suelo con diferente sistema silvopastoril en la Lanura Norte de Nayarit. *Cultivos Tropicales*, *31*(2), 48–55. Retrieved from <http://scielo.sld.cu/pdf/ctr/v31n2/ctr07210.pdf>
- Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R. E., De Deyn, G., de Goede, R., ... Brussaard, L. (2018, May 1). Soil quality – A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, Vol. 120, pp. 105–125. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>
- Certini, G., & Scalenghe, R. (2010). Do soils exist outside Earth? *Planetary and Space Science*, *58*(14–15), 1767–1770. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2010.08.024>
- Certini, G., & Ugolini, F. C. (2013). An updated, expanded, universal definition of soil. *Geoderma*, *192*, 378–379. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.07.008>
- Cotler, H., Cram, S., Martinez-Trinidad, S., & Quintanar, E. (2013). Forest soil

conservation in central Mexico: An interdisciplinary assessment. *Catena*, 104, 280–287. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.12.005>

Cotler, H., Sotelo, E., Dominguez, J., Zorrilla, M., Cortina, S., & Quiñones, L. (2007). La conservación de suelos: un asunto de interés público. *Gaceta Ecológica*, 83(2007), 5–71. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=53908302>

Cruz-Cárdenas, G., López-Mata, L., Ortiz-Solorio, C. A., Villaseñor, J. L., Ortiz, E., Silva, J. T., & Estrada-Godoy, F. (2014). Interpolation of mexican soil properties at a scale of 1:1,000,000. *Geoderma*, 213, 29–35. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.07.014>

Cruz, A. B., Barra, J. E., Castillo, R. F. del, & Gutiérrez, C. (2004). La calidad del suelo y sus indicadores. *Revista Ecosistemas*, 13(2). <https://doi.org/10.7818/RE.2014.13-2.00>

Estrada-Herrera, I. R., Hidalgo-Moreno, C., Guzmán-Plazola, R., Almaraz, J. J., Navarro-Garza, H., & Etchevers-Barra, J. D. (2017). Indicadores de calidad de suelo para evaluar su fertilidad. *Agrociencia*, 51(8), 813–831. Retrieved from <http://www.colpos.mx/agrocien/Bimestral/2017/nov-dic/art-1.pdf>

Fernández, P. R., Acevedo, D. C., Villanueva, A., & Uribe, M. (2016). Estado de los elementos químicos esenciales en suelos de los sistemas natural, agroforestal y monocultivo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7(35), 65–77. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/remcf/v7n35/2007-1132-remcf-7-35-00065.pdf>

Geissen, V., Sánchez-Hernández, R., Kampichler, C., Ramos-Reyes, R., Sepulveda-Lozada, A., Ochoa-Goana, S., ... Hernández-Daumas, S. (2009). Effects of land-use change on some properties of tropical soils — An example from Southeast Mexico. *Geoderma*, 151(3–4), 87–97. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.03.011>

Geissert, D., Ramírez, M., & Meza, E. (2000). Propiedades físicas y químicas de un suelo volcánico bajo bosque y cultivo en Veracruz, México. *Foresta Veracruzana*, 2(001), 31–34. <https://doi.org/ISSN:1405-7247>

Gibbs, H. K., & Salmon, J. M. (2015, February 1). Mapping the world's degraded lands. *Applied Geography*, Vol. 57, pp. 12–21. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.11.024>

Gmach, M. R., Dias, B. O., Silva, C. A., Nóbrega, J. C. A., Lustosa-Filho, J. F., & Siqueira-Neto, M. (2018). Soil organic matter dynamics and land-use change on Oxisols in the Cerrado, Brazil. *Geoderma Regional*, 14. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2018.e00178>

H. Tam, K. (1996). *Soil sampling, preparation, and analysis*. New York, United States: Marcel Dekker, Inc.

Haghighi, F., Gorji, M., & Shorafa, M. (2010). A study of the effects of land use changes on soil physical properties and organic matter. *Land Degradation and Development*, 21(5), 496–502. <https://doi.org/10.1002/ldr.999>

- Hajabbasi, M. a, Jalalian, a, & Karimzadeh, H. R. (1997). Deforestation effects on soil physical and chemical properties, Lordegan, Iran. *Plant and Soil*, 190(1975), 301–308. <https://doi.org/Doi 10.1023/A:1004243702208>
- Henríquez, C., Uribe, L., Valenciano, A., & Nogales, R. (2014). Actividad enzimática del suelo -Deshidrogenasa, B-glucosidasa, Fosfatasa y Ureasa- bajo diferentes cultivos. *Agronomía Costarricense*, 38(1), 43–54. Retrieved from <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agrocost/article/view/15118/14406>
- Hernández, J. O., Gutiérrez, M. del C., Ortiz-Solorio, C. A., Sánchez, P., & Ángeles, E. (2017). Calidad de Andosols en sistemas forestal, agroforestal y agrícola con diferentes manejos en Zacatlán, Puebla. *Terra Latinoamericana*, 35, 179–189. <https://doi.org/https://doi.org/10.28940/terra.v35i2.201>
- Hillel, D. (1998). *Environmental soil physics*. San Diego, California: Academic Press.
- INEGI. (2016). Carta de Uso de Suelo y Vegetación Serie VI. Retrieved June 27, 2018, from Ciudad de México, México website: <http://www.beta.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463173359>
- IUSS Working-Group WRB. (2015). Base referencial mundial del recurso suelo 2014, Actualización 2015. In *Base referencial mundial del recurso suelo*.
- Khresat, S., Al-Bakri, J., & Al-Tahhan, R. (2008). Impacts of land use/cover change on soil properties in the Mediterranean region of northwestern Jordan. *Land Degradation & Development*, 19(4), 397–407. <https://doi.org/10.1002/ldr.847>
- Krasilnikov, P., Gutiérrez-Castorena, M. del C., Ahrens, R. J., Cruz-Gaistardo, C. O., Sedov, S., & Solleiro-Rebolledo, E. (2013). The Soils of Mexico. In *The Soils of Mexico*. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-5660-1>
- Lal, R. (1996). Deforestation and land-use effects on soil degradation and rehabilitation in western Nigeria. II. Soil chemical properties. *Land Degradation & Development*, 7(2), 87–98. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-145X\(199606\)7:2<87::AID-LDR219>3.0.CO;2-X](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-145X(199606)7:2<87::AID-LDR219>3.0.CO;2-X)
- Maharjan, M., Sanaullah, M., Razavi, B. S., & Kuzyakov, Y. (2017). Effect of land use and management practices on microbial biomass and enzyme activities in subtropical top-and sub-soils. *Applied Soil Ecology*, 113, 22–28. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.01.008>
- Medina-Méndez, J., Volke-Haller, V., González-Ríos, J., Galvis-Spínola, A., Santiago-Cruz, M., & Cortés-Flores, J. (2014). Cambios en las propiedades físicas del suelo a través del tiempo en los sistemas de maíz bajo temporal y mango bajo riego en Luvisoles del estado de Campeche. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 22(2). <https://doi.org/10.19136/era.a22n2.320>
- Mi, W., Sun, Y., Xia, S., Zhao, H., Mi, W., Brookes, P. C., ... Wu, L. (2018). Effect of inorganic fertilizers with organic amendments on soil chemical properties and rice yield in a low-productivity paddy soil. *Geoderma*, 320(August 2016), 23–29. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.01.016>

- Mitra, G. (2017). *Essential Plant Nutrients* (M. Naeem, A. A. Ansari, & S. S. Gill, Eds.). <https://doi.org/10.1007/978-3-319-58841-4>
- Moghimian, N., Hosseini, S. M., Kooch, Y., & Darki, B. Z. (2017). Impacts of changes in land use/cover on soil microbial and enzyme activities. *Catena*, *157*, 407–414. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.06.003>
- Murray, R. M., Orozco, M. G., Hernández, A., Lemus, C., & Nájera, O. (2014). El sistema agroforestal modifica el contenido de materia orgánica y las propiedades físicas del suelo. *Avances En Investigación Agropecuaria*, *18*(1), 23–31. Retrieved from <http://www.redalyc.org/pdf/837/83729789003.pdf>
- Ortiz-Villanueva, B., & Ortiz-Solorio, C. A. (1990). *Edafología* (7ma. ed.; V. A. Gómez Cuevas, Ed.). Chapingo, Méx.: Universidad Autónoma Chapingo.
- Osman, K. T. (2013a). *Forest Soils*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-02541-4>
- Osman, K. T. (2013b). *Soils*. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-5663-2>
- Pacheco, F. A. L., Sanches-Fernandes, L. F., Valle-Junior, R. F., Valera, C. A., & Pissarra, T. C. T. (2018). Land degradation: multiple environmental consequences and routes to neutrality. *Current Opinion in Environmental Science & Health*. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.07.002>
- Pajares, S., Gallardo, J. F., Masciandaro, G., Ceccanti, B., & Etchevers, J. D. (2011). Enzyme activity as an indicator of soil quality changes in degraded cultivated Acrisols in the Mexican Trans-volcanic Belt. *Land Degradation and Development*, *22*(3), 373–381. <https://doi.org/10.1002/ldr.992>
- Palma-López, D. J., Salgado-García, S., Martínez, G., Zavala-Cruz, J., & Lagunes-Espinoza, L. del C. (2015). Cambios en las propiedades del suelo en plantaciones de eucalipto de Tabasco, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, *2*(5), 163–172. Retrieved from www.ujat.mx/era
- Paz-Ferreiro, J., Trasar-Cepeda, C., Leirós, M. C., Seoane, S., & Gil-Sotres, F. (2007). Biochemical properties of acid soils under native grassland in a temperate humid zone. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, *50*(4), 537–548. <https://doi.org/10.1080/00288230709510321>
- Porta, J., López-Acevedo, M., & M. Poch, R. (2014). *Edafología. Uso y protección de suelos* (3era.). Madrid, España: Mundi-Prensa.
- Qi, Y., Chen, T., Pu, J., Yang, F., Shukla, M. K., & Chang, Q. (2018). Response of soil physical, chemical and microbial biomass properties to land use changes in fixed desertified land. *Catena*, *160*, 339–344. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.10.007>
- Registro Agrario Nacional. (2019). Polígonos ejidales o comunales. Retrieved November 27, 2019, from Datos geográficos perimetrales de los núcleos agrarios certificados para el estado de Oaxaca website: <https://datos.gob.mx/busca/dataset/datos-geograficos-perimetrales-de-los-nucleos-agrarios-certificados-por-estado--formato-shape/resource/37fdb794-9447-49a6-8b18-7c405f09d800>

Rodríguez, A., Cristóbal, D., Álvarez, E., & Uribe, M. (2016). Indicadores de calidad de un suelo para la producción de maíz bajo sistemas agroforestal y monocultivo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, (16), 3263–3275. Retrieved from <http://www.redalyc.org/pdf/2631/263146726009.pdf>

SEMARNAT. (2016a). *Resumen Ejecutivo. Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave, de Desempeño Ambiental y de Crecimiento Verde* (2015th ed.). Ciudad de México.

SEMARNAT. (2016b). Suelos. In *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave, de Desempeño Ambiental y de Crecimiento Verde* (2015th ed., pp. 153–190). Retrieved from http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe15/tema/pdf/Cap3_Suelos.pdf

SIAP. (2019). Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. Retrieved April 18, 2019, from <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>

Singh, B. P., Cowie, A. L., & Chan, K. Y. (Eds.). (2011). *Soil Health and Climate Change*. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-20256-8>

Soil Survey Staff. (2014). Claves para la Taxonomía de Suelos. *United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center*, 410. <https://doi.org/10.1109/TIP.2005.854494>

Sustaita-Rivera, F., Ordaz-Chaparro, V., Ortiz-Solorio, C., & de León-González, F. (2000). Cambios en las propiedades físicas de dos suelos de una región semiárida debidos al uso agrícola. *Agrociencia*, 34(4), 379–386. Retrieved from <http://www.redalyc.org/html/302/30234401/>

Vanwalleghem, T., Gómez, J. A., Infante Amate, J., González de Molina, M., Vanderlinden, K., Guzmán, G., ... Giráldez, J. V. (2017, March 1). Impact of historical land use and soil management change on soil erosion and agricultural sustainability during the Anthropocene. *Anthropocene*, Vol. 17, pp. 13–29. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2017.01.002>

Vergara-Sánchez, M. A., Etchevers-Barra, J. D., & Padilla-Cuevas, J. (2005). Hillside soils fertility at the Oaxaca's northern sierra, Mexico. *Agrociencia*, 39, 259–266. Retrieved from <http://www.colpos.mx/agrocien/Bimestral/2005/may-jun/art-2.pdf>

Vergara-Sánchez, M. Á., Etchevers-Barra, J. D., & Vargas-Hernández, M. (2004). Variabilidad del carbono orgánico en suelos de ladera del sureste de México. *Terra Latinoamericana*, 22(3), 359–367. Retrieved from <http://www.redalyc.org/pdf/573/57322313.pdf>

Zhang, M., Sparrow, S. D., van Veldhuizen, B., & Masiak, D. T. (2012). Soil quality under different land uses in a subarctic environment in Alaska. *Journal of Land Use Science*, 7(1), 109–121. <https://doi.org/10.1080/1747423X.2010.537788>

3. EFECTO DE TRES SISTEMAS DE PRODUCCIÓN SOBRE EL ESTADO DE LA FERTILIDAD FÍSICA DEL SUELO⁶

3.1. RESUMEN/ABSTRACT

La fertilidad física del suelo es fundamental para una producción óptima. Los sistemas de uso del suelo (SUS) pueden modificar de manera positiva o negativa a esta fertilidad. Los objetivos de este estudio fueron determinar la influencia de los sistemas agrícola (SA), forestal (SF) y pastizal (SP) sobre las propiedades físicas de un suelo tropical y ver si el tipo de muestreo incidía sobre el cumplimiento de los supuestos de normalidad de datos y homocedasticidad de varianzas de las variables físicas, así como en la determinación de la significancia de los efectos de los sistemas. Para cumplir los objetivos se realizó un muestreo de suelo a las profundidades de 0 a 10 y 10-a 20 cm obteniéndose 48 muestras de suelo 24 simples y 24 compuestas. Las determinaciones realizadas fueron textura, densidad real (D_r), densidad aparente (D_{ap}), capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP), humedad aprovechable (HA), estabilidad de agregados (EA), porosidad total (PT) y conductividad hidráulica (K_s). Los resultados mostraron que para ambos tipos de muestreo el SF evidenció una mayor D_{ap} , una menor PT, CC, PMP y HA. Por su parte, el SP evidenció una mayor CC, PMP, HA y EA. El SA propició valores intermedios respecto a estas variables. La PM de 0 a 10 cm evidenció valores mayores para la mayoría de las variables. El SP resultó ser el mejor al tener una mayor cantidad de valores convenientes de las variables. El tipo de muestreo afectó a los valores medios obtenidos para todas las variables. La mayoría de las variables cumplieron con los supuestos de normalidad y homocedasticidad de varianzas a excepción de la D_{ap} , PT y K_s .

Palabras clave: agrícola, fertilidad, hule, pastizal, propiedades físicas

EFFECT OF THREE PRODUCTION SYSTEMS ON THE STATE OF THE PHYSICAL FERTILITY OF THE SOIL

The physical fertility of the soil is essential for optimal production. Land use systems (LUS) can positively or negatively modify this fertility. The objectives of this study were to determine the influence of the agricultural (AS), forestry (FS) and grassland (GS) systems on the physical properties of a tropical soil and see

⁶ Tesis de Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo

Autor: Jorge Luis Nuñez Peñaloza

Director de Tesis: Dr. David Cristóbal Acevedo

if the type of sampling affected compliance with the assumptions of normality of data and homocedasticity of variances of the physical variables, as well as in the determination of the significance of the effects of the systems. To fulfill the objectives a soil sampling was carried out at the depths (DS) of 0 to 10 and 10-to 20 cm obtaining 48 soil samples, 24 simple and 24 composed. The determinations were texture, particle density (D_p), bulk density (D_b), field capacity (FC), permanent wilting point (PWP), water holding capacity (WHC), aggregate stability (AE), total porosity (TP) and hydraulic conductivity (K_s). The results showed that for both types of sampling the FS showed a higher D_b , a lower TP, FC, PWP and WHC. For its part, the GS showed a greater FC, PWP, WHC and AE. The AS provided intermediate values with respect to these variables. The DS from 0 to 10 cm showed higher values for most of the variables. The GS proved to be the best because it had a greater amount of convenient values of the variables. The type of sampling affected the average values obtained for all variables. Most of the variables complied with the assumptions of normality and homocedasticity of variances except for D_b , TP and K_s .

Keywords: agricultural, soil fertility, rubber, grassland, physical properties

3.2. INTRODUCCIÓN

La fertilidad física del suelo se entiende como la capacidad del suelo de proporcionar condiciones físicas óptimas que apoyen la productividad, la reproducción y la calidad de plantas (Abbot & Murphy, 2007). Esta clase de fertilidad se puede monitorear mediante el estudio de las propiedades físicas tales como: textura, densidad aparente, capacidad de almacenamiento de agua, porosidad, estabilidad de agregados, conductividad hidráulica (Brady & Weil, 1999; Osman, 2013a).

Conocer el valor de las propiedades físicas sirve para evaluar la condición del suelo, da información sobre el efecto del cambio en el uso del suelo y el impacto que tienen las prácticas agrícolas, pecuarias y forestales sobre el deterioro o funcionamiento de este (Estrada-Herrera et al., 2017). La intensificación de la agricultura genera una reducción en la fertilidad física (Rios, González-Mora, Cotler, & Pineda, 2015).

Alrededor del mundo, se han realizado investigaciones para probar el impacto del cambio de uso de suelo sobre la fertilidad del mismo (Boley, Drew, & Andrus, 2009; Cantú, Díaz, Yáñez, González, & Martínez, 2018; Fernández, Acevedo, Villanueva, & Uribe, 2016; Kassa, Dondeyne, Poesen, Frankl, & Nyssen, 2017; Khresat, Al-Bakri, & Al-Tahhan, 2008; Yáñez, Cantú, & González, 2018). Estos autores han reportado que propiedades físicas como la densidad aparente, capacidad de campo, son mejores en sistemas forestales que en sistemas agrícolas (Boley et al., 2009; Fernández et al., 2016). Concluyen que los suelos agrícolas exhiben un estado de baja fertilidad física debido principalmente a los cambios en el uso de suelo (Cantú Silva et al., 2018; Yáñez et al., 2018).

Algunos de estos estudios (Boley et al., 2009; Fernández et al., 2016; Kassa et al., 2017; Khresat, Al-Bakri, & Al-Tahhan, 2008) emplean el análisis de varianza (ANDEVA) para encontrar estas diferencias sin mencionar si cumplieron o no alguno de los supuestos básicos, tales como normalidad e igualdad de varianzas (homocedasticidad) de los valores. La homocedasticidad significa que las varianzas de los errores de las diversas propiedades deben ser iguales y la normalidad significa que los errores de las diversas propiedades deben seguir la distribución normal. El no cumplimiento de estos supuestos básicos permitirá tomar una de las diversas medidas alternativas posibles para remediar la situación.

El objetivo de este estudio fue medir las propiedades físicas de un suelo con los usos agrícola, forestal y de pastizal a dos profundidades para: a) determinar el efecto de los usos y las profundidades sobre las propiedades físicas de un suelo tropical b) determinar si los métodos de muestreo inciden sobre el cumplimiento de los supuestos de normalidad de datos y homocedasticidad de varianzas de las variables físicas c) determinar si el método de muestreo incide en la determinación de la significancia de los efectos de los sistemas de uso de suelo y las profundidades y d) determinar cuál sistema de uso de suelo presenta los valores más convenientes de las variables físicas desde el punto de vista agronómico.

3.3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.3.1. Área de estudio

El área de estudio se ubica en el ejido de General Felipe Ángeles, perteneciente al municipio de San Juan Mazatlán en el estado de Oaxaca, en las coordenadas geográficas 17° 20' 35.98" N y 95° 19' 8.11" O, con una altitud de 63 msnm. El ejido forma parte de la provincia fisiográfica Llanura Costera del Golfo Sur, subprovincia Llanura Costera Veracruzana y el relieve se caracteriza por ser lomerío (INEGI, 2001a, 2001c, 2001b). Los tipos de rocas presentes son sedimentarias como la arenisca, conglomerado de la era Cenozoica y caliza de la era Mesozoica, ígneas intrusivas como el granito de la era Paleozoica también están presentes (INEGI, 2019). La precipitación anual promedio es de 2,020.3 mm año⁻¹, la temperatura promedio oscila entre 20.3 y 30.8 °C con una media de 25.6 °C (Krasilnikov et al., 2013; SMN-CNA, 2019), presentándose un clima cálido húmedo con abundantes lluvias en verano (INEGI, 2019). El mapa de suelos indica la presencia de Luvisoles y Fluvisoles como suelos dominantes (INEGI, 2019).

La vegetación en gran parte de la superficie del ejido consiste principalmente en pastos introducidos como *Brachiaria brizantha* Stapf cv. Marandú destinados a la alimentación del ganado bovino, plantaciones de limón persa (*Citrus latifolia* Tan.) para exportación, cultivos de maíz (*Zea mays* L.) y frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) para autoconsumo y plantaciones forestales comerciales de *Hevea brasiliensis* Muell. Arg. para la obtención de hule (Figura 1). La vegetación forestal nativa consiste en árboles dispersos dentro de las parcelas de los ejidatarios como cedro rojo (*Cedrela odorata* L.), caoba (*Swietenia macrophylla* King), guácimo (*Guazuma ulmifolia* Lam.) y *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb.



Figura 1. (a) Pastizal inducido de *Brachiaria brizantha* Stapf cv. Marandú destinado para la alimentación de ganado bovino, (b) y (c) cultivo de limón persa (*Citrus latifolia* Tan.) para exportación, (d) y (e) plantación forestal de *Hevea brasiliensis* Muell. Arg. para la extracción de hule

3.3.2. Muestreo de suelos y análisis de laboratorio

El muestreo se realizó del 27 al 29 de julio de 2018. Primero se realizó un recorrido para ubicar los sistemas uso de suelo (SUS), tomando como referencia el tipo de suelo dominante (Luvisol umbrihúmico) y los SUS forestal, pastizal y agrícola (Cuadro 1). En cada SUS se establecieron cuatro áreas de muestreo elegidas al azar de 20 x 20 m² de acuerdo con Kassa et al. (2017). Al centro de cada área se tomó una muestra simple (MS) con ayuda de una pala de corte. De igual manera, en cada área se tomaron 16 submuestras para formar una sola muestra compuesta (MC), de acuerdo con el procedimiento de Carretero, Marasas, Souza y Rocha (2016). En total se tomaron 48 muestras de suelo, 24

simples y 24 compuestas, considerando las cuatro áreas, los tres SUS y dos profundidades de muestreo (PM) de 0 a 10 cm (PM1) y de 10 a 20 cm (PM2).

Cuadro 1. Características de los sistemas de uso de suelo elegidos

Establecimiento	Manejo (años)	Uso actual	Localización
1988	30 años	Plantación forestal	17° 21' 20.48" N 95° 20' 20.54" O
1988	25 años	Pastizal	17° 21' 15.40" N 95° 20' 19.89" O
2008	8 años	Agrícola	17° 20' 59.27" N 95° 18' 53.24" O

La elección de las profundidades fue debido a que a éstas, la gran mayoría de nutrimentos y propiedades físicas adquieren los valores más representativos del suelo, y por otro lado a estas profundidades se encuentra la mayor proporción de raíces (Carretero et al., 2016).

Las muestras de suelo fueron transportadas en bolsas de plástico con su respectiva etiqueta de identificación. Las muestras fueron secadas al aire, sin exposición directa a los rayos del sol y extendidas sobre papel estraza (NOM-021-RECNAT, 2002). Una vez secas, se procedió a molerlas con un mazo de madera y tamizarlas a través de una malla de abertura de 2 mm (Hernández et al., 2017).

Las propiedades físicas evaluadas en cada muestra de suelo fueron: densidad aparente (D_{ap}) por el método del terrón parafinado (Blake, 1965); densidad real (D_r) por el método del picnómetro (Blake & Hartge, 1986); textura del suelo por el método de Bouyoucos (Gee & Bauder, 1986); capacidad de campo (CC) determinado mediante olla de presión; punto de marchitez permanente (PMP) determinado mediante membrana de presión, las anteriores determinaciones se hicieron siguiendo la NOM-021-RECNAT (2002); estabilidad de agregados (EA)

por el método de Yoder con un tamiz de abertura 0.25 mm (Amézqueta, 1999); conductividad hidráulica (K_s) mediante el procedimiento del permeámetro de carga constante en muestras saturadas (Klute & Dirksen, 1986); humedad aprovechable (HA) como la diferencia entre CC y PMP (Brady & Weil, 1999); y porosidad total (PT) utilizando la D_{ap} y la D_r (Brady & Weil, 1999).

3.3.3. Análisis estadístico

Con la información obtenida se elaboró una base de datos, la cual se analizó y se interpretó con ayuda de pruebas estadísticas. Los datos fueron analizados bajo un diseño factorial 3x2, con cuatro repeticiones; dónde el primer factor correspondió al uso de suelo (SUS), y el segundo factor a la profundidad (PM), así como su interacción (SUS*PM). Se realizaron pruebas de normalidad de Shapiro-Wilk (S-W) y de homocedasticidad de varianzas de Levene (L). Posteriormente se realizó un análisis de varianza (ANDEVA) de dos vías con repeticiones iguales y se hicieron comparaciones de medias de Tukey para determinar diferencias significativas por SUS, PM y SUS*PM. Las variables que no cumplieron los supuestos de normalidad de datos y/o de homocedasticidad de varianzas, se analizaron mediante una prueba no paramétrica, ART ANDEVA (Mangiafico, 2016). En caso de existir diferencia significativa en el factor interacción, los valores medios correspondían al promedio de la variable en las cuatro áreas y las comparaciones de medias se realizaron con la prueba de pairwise. Se empleó el software RStudio para R 3.6.1, así como Microsoft Excel®. La comparación entre los SUS y las PM se evaluó mediante el criterio de “mayor es mejor” donde se agrupan aquellas propiedades donde lo más conveniente para el funcionamiento es que esas propiedades tengan un valor alto (PT, CC, PMP, HA EA y K_s) y de “menor es mejor” donde lo más conveniente para el funcionamiento es que esas propiedades presenten un valor bajo (D_{ap}) (Hernández-González, Muñoz-Iniestra, López-Galindo & Hernández-Moreno, 2018).

3.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.4.1. Textura

Se observa que para la arena el mayor contenido fue para el SF y el menor para el SA, en el caso de las profundidades se tuvo un mayor contenido en la PM1. Para el limo el comportamiento fue diferente pues el sistema con un mayor contenido fue el SA y con un menor contenido el SF, en el caso de las profundidades el mayor contenido se dio en la PM1. Para la arcilla el mayor contenido ocurrió en los SA y SP con valores similares y el menor contenido se dio en el SF; para las profundidades el mayor contenido ocurrió en la PM2 (Figura 2).

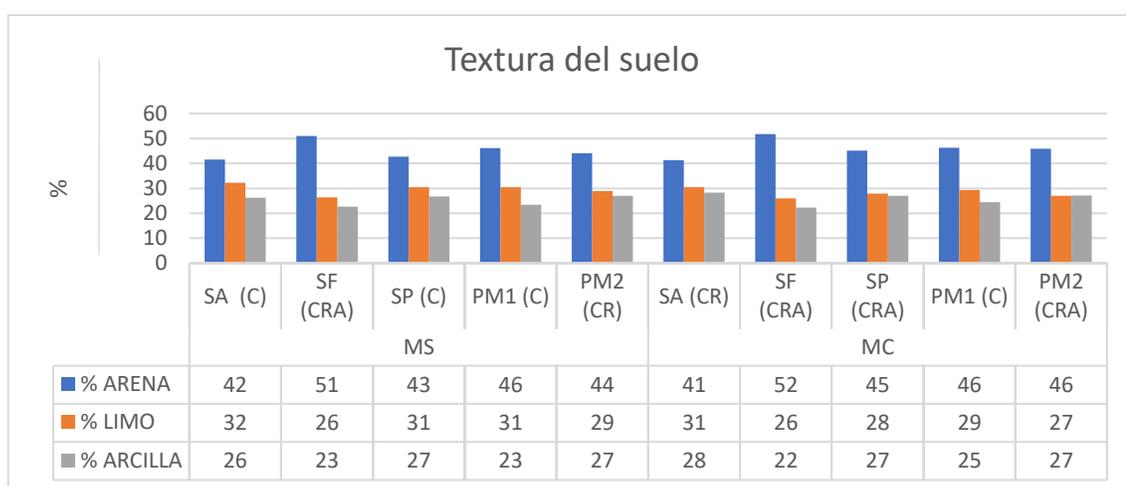


Figura 2. Valores medios de los porcentajes (%) de arenas, limos y arcillas para cada uno de los SUS y PM. C: franca, CR: franco arcillosa, CRA: franco arcillo arenosa, SA: sistema agrícola, SF: sistema forestal, SP: sistema pastizal, PM1: profundidad de 0 a 10 cm, PM2: profundidad de 10 a 20 cm, MS: muestra simple y MC: muestra compuesta

Se puede observar que la diferencia mayor en cuanto a % de arena, limo y arcilla se dio para la arena que en el SF fue de 51 % y en los SA y SP fue de 42 y 43 % respectivamente para la MS y para la MC respectivamente, el contenido de arena en el SF fue de 52 % y en los SA y SP fue de 41 y 45 % respectivamente. Esto puede impactar en el valor de otras variables tanto físicas como químicas.

Utilizando los valores medios de % de arena, limo y arcilla de los SF, SA y SP para la MS, los suelos se clasificaron como de textura franco arcillo arenosa, franca y franca respectivamente, y para la MC, los suelos se clasificaron como de textura franca arcillo arenosa, franco arcillosa y franco arcillo arenosa respectivamente.

En el caso de las profundidades tanto de 0 a 10 cm, se tuvo una textura franca y para 10 a 20 franco arcillosa, con una desviación en la PM2 para la MC dónde fue franco arcillo arenosa.

Podemos observar que de manera general se tiene que el SA y SP son suelos homogéneos en cuanto a clase textural, con una desviación en el SF cuyo contenido de arena fue más alto. Kassa et al. (2017) menciona que al ser semejante la textura del suelo, revela la presencia de un mismo material parental.

Con relación a los métodos de MS y MC se tuvieron diferencias en los % de arena, % de limo y % de arcilla para un mismo SUS, pero estas diferencias no fueron mayores de dos unidades a excepción del SP donde la diferencia para el % de limo fue de tres unidades.

En relación al mayor % de arcilla encontrados en la PM2, es posible que esto se deba a que la arcilla migró a profundidades más bajas dentro del perfil del suelo (Cantú Silva et al., 2018; Khresat, Al-Bakri, & Al-Tahnan, 2008). En tres sistemas de uso de suelo en México, Cruz-Ruiz et al. (2012) no encontraron diferencias en la textura atribuidas al SUS, lo que concuerda con este estudio.

3.4.2. Densidad real

En la MS, se observa que para la D_r el mayor valor fue para el SA y el menor para el SP, en el caso de las profundidades se tuvo un mayor valor en la PM2. En la MC, el valor de D_r más alto fue en el SF y el valor más bajo en el SA, de igual manera se tuvo un mayor valor en la PM2 (Figura 3). Utilizando los valores medios de D_r de los SF, SA y SP los suelos presentan valores por debajo del

valor indicado para la mayoría de suelos minerales según Brady y Weil (1999) y Hillel (1998). La misma conclusión se aplicó para ambas profundidades.

Se observa que de manera general se tienen suelos homogéneos en cuanto a D_r , con valores muy cercanos a 2.65 Mg m^{-3} , que es el promedio para la mayoría de los suelos minerales. Aunque se considera que la D_r no es una variable respuesta que responda a los SUS, se encontraron diferencias con respecto al valor de 2.65 Mg m^{-3} que en la mayoría de los casos en los SUS y PM fue menor.

Hay que hacer notar que se presenta una variación en los valores de D_r , situación que es difícil de explicar pues difiere de lo señalado en la literatura en el sentido de que ésta es una propiedad del suelo muy estable, como lo señala Medina-Méndez et al. (2014). El valor menor a 2.65 Mg m^{-3} puede deberse a la efectividad en la destrucción de la MO, pues ésta disminuye la D_{ap} de los suelos minerales.

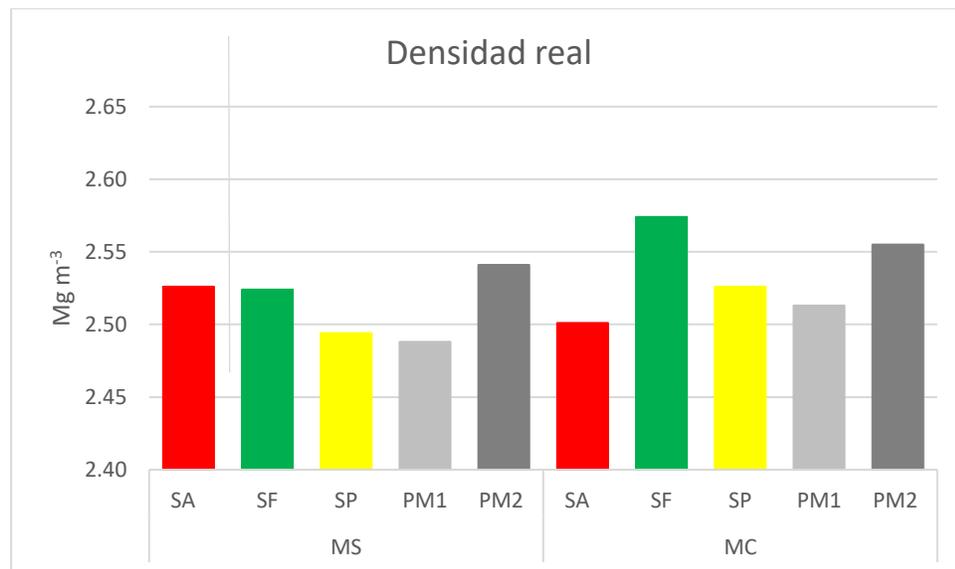


Figura 3. Valores medios para la D_r (Mg m^{-3}) en los SUS y las dos PM. SA: sistema agrícola, SF: sistema forestal, SP: sistema pastizal, PM1: profundidad de 0 a 10 cm, PM2: profundidad de 10 a 20 cm, MS: muestra simple y MC: muestra compuesta

3.4.3. Densidad aparente

En el Cuadro 2 se puede observar que en general los valores medios de densidad aparente (D_{ap}) en los tres SUS y las dos PM, fueron mayores con el MC en comparación con el MS, aunque la diferencia mayor entre los valores fue de dos décimas.

No existió regularidad en el orden de los valores medios al utilizar el MC y el MS, pues para el primero el orden fue $SF > SA > SP$ y para el segundo fue $SF > SP > SA$. Para las PM si existió regularidad pues tanto con el MC como con el MS en la PM2 se tuvieron los valores mayores. Con los valores medios de D_{ap} de los SF, SA y SP en ambas profundidades, los suelos se clasificaron como arenosos, según la NOM-021-RECNAT (2002).

Se puede observar que de manera general se tuvieron suelos homogéneos en cuanto a D_{ap} con una desviación en el SF cuyo valor de D_{ap} fue más alto, debido al mayor contenido de arena. Para el caso de la PM2, está fue mayor debido al bajo contenido de materia orgánica, menor agregación y mayor compactación (Flores & Alcalá, 2010).

Para el MS los valores cumplieron con la condición de normalidad de datos y de homocedasticidad de varianzas, el ANDEVA indicó que para el factor SUS al igual que para la interacción se verificaron diferencias significativas ($P < 0.05$). En estos casos de significancia en la interacción, sería complicado examinar los efectos del factor por separado debido a que su efecto no es aditivo, es decir, que el efecto de los SUS sobre la D_{ap} parece no ser el mismo a lo largo de las PM (Lyman & Longnecker, 2010). Por lo que, las pruebas post-hoc se realizaron comparando los tres niveles del factor SUS con los dos niveles del factor PM para encontrar diferencias significativas entre pares de medias. La prueba de Tukey para la MS evidenció diferencias significativas en las medias del SF y del SA en la PM2, con 1.52 y 1.30 $Mg\ m^{-3}$ respectivamente.

Para la MC, los valores no se ajustaron a la normalidad ($P < 0.01$), pero si a la homocedasticidad de varianzas, por lo que fue necesario analizarlos mediante la prueba ART ANDEVA. En dicha prueba, se verificó diferencia significativa ($P < 0.05$) sólo para la interacción. La prueba de pairwise evidenció diferencias

significativas en las medias del SA y del SP en la PM1, con 1.49 y 1.37 Mg m⁻³ respectivamente, y en las medias del SF y del SP en la PM1, con 1.51 y 1.37 Mg m⁻³ respectivamente. Estos valores medios corresponden al promedio de cada combinación de SUS y PM.

De los resultados anteriores se puede afirmar que los valores de D_{ap} si fueron afectados por el tipo de muestreo, pero de manera no significativa. El orden de los valores en función de los sistemas si fue afectado por el tipo de muestreo. El orden de los valores en función de las profundidades no fue afectado por el tipo de muestreo. El cumplimiento de la normalidad y homocedasticidad si fue afectado por el tipo de muestreo. Se tuvo efecto de la interacción entre los SUS y las PM sobre la variable D_{ap}.

Cuadro 2. Valores medios para la densidad aparente (D_{ap}) estudiada en los distintos SUS y PM

MUESTRA	FACTOR		D _{ap} Mg m ⁻³
MS	SUS n = 8	SA	1.35
		SF	1.46
		SP	1.43
	PM n = 12	0 a 10 cm	1.40
		10 a 20 cm	1.42
MC	SUS n = 8	SA	1.50
		SF	1.52
		SP	1.47
	PM n = 12	0 a 10 cm	1.46
		10 a 20 cm	1.53
MS	<i>p-value</i> SUS*PM		0.02
MC			0.04

SUS: sistema de uso de suelo; **PM:** profundidad de muestreo; **MS:** muestra simple; **MC:** muestra compuesta; **SA:** sistema agrícola; **SF:** sistema forestal; **SP:** sistema pastizal; **D_{ap}:** densidad aparente

Soleimani et al. (2019) reporta valores de D_{ap} mayores en suelos con cobertura de bosque natural y en los dedicados a la agricultura, al comparar diversos suelos sometidos a distintos manejos, la misma condición se reporta a medida que se

aumentaba en la profundidad. Estos anteriores resultados son congruentes con los valores obtenidos para D_{ap} en esta investigación, y se deben al peso de los horizontes suprayacentes (Soleimani et al., 2019) y al bajo contenido de materia orgánica en horizontes arenosos, como se señaló anteriormente.

3.4.4. Porosidad total

En el Cuadro 3 se puede observar que en general los valores medios de porosidad total (PT) en los tres SUS y las dos PM, fueron mayores con el MS en comparación con el MC, aunque la diferencia mayor entre los valores fue de cuatro puntos porcentuales.

No existió regularidad en el orden de los valores medios al utilizar el MC y el MS, pues para el primero el orden fue $SP > SF > SA$ y para el segundo fue $SA > SP > SF$. Para las PM no existió regularidad pues con el MC la PM1 tuvo el valor mayor, en cambio con el MS los valores fueron iguales en ambas PM. Con los valores medios de PT de los SF, SA y SP los suelos presentan valores menores que 50%, este en general es un valor típico de suelos cultivados, según se reporta por Brady y Weil (1999).

De manera general se tienen suelos heterogéneos en cuanto a PT. Así mismo, los valores reportados en este estudio son menores que los reportados para suelos con texturas finas y valores elevados de materia orgánica, como los reportados por Medina-Méndez et al. (2014) y Murray, Orozco, Hernández, Lemus y Nájera (2014).

Para el MS los valores cumplieron con la condición de normalidad y de homocedasticidad de varianzas y los resultados del ANDEVA indicaron que para el factor SUS ($P < 0.05$) al igual que para la interacción ($P < 0.01$) se verificaron diferencias significativas ($P < 0.05$). La prueba de Tukey en la MS, evidenció diferencias significativas entre las medias del SA para la PM1 con 43.3 % y del SF para la PM1 y del SA para la PM2, con 44.5 y 49.5 % respectivamente, así como entre las medias del SF para la PM2 con 40.0 % y del SF para la PM1 y del

SA para la PM2, cuyos valores ya fueron mencionados. Estos valores medios corresponden al promedio de cada combinación de SUS y PM.

Para la MC, los valores no se ajustaron a la normalidad (S-W, $P < 0.05$), pero si a la homocedasticidad de varianzas, por lo que fue necesario analizarlos mediante la prueba ART ANDEVA. En dicha prueba, no se verificaron diferencias significativas para alguno de los factores estudiados.

De los resultados anteriores se puede observar que los valores de PT si fueron afectados por el tipo de muestreo de manera significativa. El orden de los valores en función de los sistemas si fue afectado por el tipo de muestreo. El orden de los valores en función de las profundidades si fue afectado por el tipo de muestreo. El cumplimiento de la normalidad y homocedasticidad si fue afectado por el tipo de muestreo. Se tuvo efecto de la interacción entre los SUS y las PM sobre la variable PT, solo en el MS.

Cuadro 3. Valores medios y prueba de Tukey para la PT estudiada en los distintos SUS y PM

MUESTRA	FACTOR	PT	
		%	
MS	SUS	SA	46.4
		SF	42.3
		SP	42.8
	PM	0 a 10 cm	43.8
		10 a 20 cm	43.8
MC	SUS	SA	39.9 ^a
		SF	40.9 ^a
		SP	42.0 ^a
	PM	0 a 10 cm	41.9 ^a
		10 a 20 cm	39.9 ^a
MS MC	<i>p-value</i> SUS*PM	< 0.01 ns	

PT: porosidad total; valores medios con una misma letra por SUS o PM no presentan diferencias significativas (Tukey, $\alpha = 0.05$); ^{ns}: no significativo ($p\text{-value} > 0.05$). El resto de las abreviaturas como en el Cuadro 2

Haghighi, Gorji y Shorafa (2010) encontraron diferencias significativas para la PT en dos profundidades al comparar suelos con manejo agrícola y pastizal, siendo mayores en el manejo de pastizal, lo que atribuyen a la gran proporción de raíces presentes en los pastizales, sin embargo, tal y como lo señalan Volverás-Mambuscay, Amézquita-Collazos y Campo-Quesada (2016) los implementos agrícolas como el arado buscan aumentar la PT en sistemas agrícolas al romper la estructura del suelo, obteniéndose valores superiores en el corto plazo como en este estudio, al paso del tiempo estos valores tienen a disminuir y ser mucho más bajos que sistemas con vegetación natural como se advierte por Sustaita-Rivera, Ordaz-Chaparro, Ortiz-Solorio y de León-González (2000).

3.4.5. Capacidad de campo

En el Cuadro 4 se puede observar que en general los valores medios de capacidad de campo (CC) en los tres SUS y las dos PM, fueron mayores con el MS en comparación con el MC, la diferencia mayor entre los valores fue de alrededor de cinco puntos porcentuales.

Existió regularidad en el orden de los valores medios al utilizar el MC y el MS, pues para ambos el orden fue $SP > SA > SF$. Para PM si existió regularidad pues tanto con el MC como con el MS en la PM1 se tuvieron los valores mayores. los valores medios de CC de los SF, SA y SP, así como de las PM, los suelos tienen valores del orden de la mitad de los valores reportados para suelos franco arcillosos, según Daza, Hernández y Alba (2014).

Se puede observar que de manera general se tuvieron suelos heterogéneos en cuanto a CC con una desviación en el SF debido al contenido de arena que fue más alto. Hillel (1998) menciona que los valores de CC tienden a ser menores en suelos con una mayor proporción de arenas, con arcillas como la caolinita y con bajos contenidos de materia orgánica.

Para el MS los valores cumplieron con la condición de normalidad y de homocedasticidad de varianzas y los resultados del ANDEVA indicaron que tanto

para los factores como para la interacción no se verificaron diferencias significativas.

Para la MC, los valores cumplieron con la condición de normalidad y de homocedasticidad de varianzas y los resultados del ANDEVA indicaron que para el factor SUS ($P < 0.01$) se verificaron diferencias significativas. La prueba de Tukey mostró que el SP tuvo un valor estadísticamente superior a los otros dos sistemas.

De los resultados anteriores se puede afirmar que los valores de CC si fueron afectados por el tipo de muestreo de manera significativa, a excepción del SP que mostró un comportamiento similar en los dos tipos de muestreo. El orden de los valores en función de los sistemas no fue afectado por el tipo de muestreo. El orden de los valores en función de las profundidades no fue afectado por el tipo de muestreo. El cumplimiento de la normalidad y homocedasticidad no fue afectado por el tipo de muestreo. Se tuvo efecto del factor SUS sobre la variable CC sólo en el MC, por lo que para esta variable el tipo de muestreo si afecto la significancia de efectos de los SUS.

Cuadro 4. Valores medios y prueba de Tukey para la CC estudiada en los distintos SUS y PM

MUESTRA	FACTOR		CC
			%
MS	SUS	SA	27.2 ^a
		SF	25.1 ^a
		SP	29.8 ^a
	PM	0 a 10 cm	28.4 ^a
		10 a 20 cm	26.3 ^a
MC	SUS	SA	25.5 ^a
		SF	23.8 ^a
		SP	29.3 ^b
	PM	0 a 10 cm	26.9 ^a
		10 a 20 cm	25.5 ^a
MS	<i>p-value</i> SUS*PM		ns
MC			ns

CC: capacidad de campo; valores medios con una misma letra por SUS o PM no presentan diferencias significativas (Tukey, $\alpha = 0.05$); ^{ns}: no significativo ($p\text{-value} > 0.05$). El resto de las abreviaturas como en el Cuadro 2

3.4.6. Punto de marchitez permanente

En el Cuadro 5 se puede observar que en general los valores medios de punto de marchitez permanente (PMP) en los tres SUS y las dos PM, fueron mayores con el MS en comparación con el MC, aunque la diferencia mayor entre los valores fue de cerca de cinco puntos porcentuales.

Existió regularidad en el orden de los valores medios al utilizar el MC y el MS, pues para ambos el orden fue $SP > SA > SF$. Para PM si existió regularidad pues tanto con el MC como con el MS en la PM1 se tuvieron los valores mayores. Con los valores medios del PMP de los SF, SA y SP, así como de las PM, los suelos tienen valores del orden de la mitad de los valores reportados para suelos franco arcillosos, según Daza, Hernández y Alba (2014).

Se puede observar que de manera general se tienen suelos heterogéneos en cuanto a PMP con una desviación en el SF debido al contenido de arcilla que fue más bajo. De acuerdo con Brady y Weil (1999), el PMP se incrementa a medida que tenemos más proporción de arcillas en el suelo.

Para el MS los valores cumplieron con la condición de normalidad y de homocedasticidad de varianzas y los resultados del ANDEVA indicaron que tanto para los factores como para la interacción no se verificaron diferencias significativas.

Para el MC, los valores cumplieron con la condición de normalidad y de homocedasticidad de varianzas y los resultados del ANDEVA indicaron que para el factor SUS ($P < 0.001$) se verificaron diferencias significativas. La prueba de Tukey mostró que el SP tuvo un valor estadísticamente superior a los otros dos sistemas.

De los resultados anteriores se puede afirmar que los valores de CC si fueron afectados por el tipo de muestreo de manera significativa, a excepción de la PM1 que mostró un comportamiento similar en los dos tipos de muestreo. El orden de los valores en función de los sistemas no fue afectado por el tipo de muestreo. El orden de los valores en función de las profundidades no fue afectado por el tipo de muestreo. El cumplimiento de la normalidad y homocedasticidad no fue afectado por el tipo de muestreo. Se tuvo efecto del factor SUS sobre la variable PMP sólo en el MC, por lo que para esta variable el tipo de muestreo si afecto la significancia de efectos de los SUS.

Cuadro 5. Valores medios y prueba de Tukey para el PMP estudiado en los distintos SUS y PM

MUESTRA	FACTOR	PMP	
		%	
MS	SUS	SA	14.6 ^a
		SF	13.0 ^a
		SP	16.1 ^a
	PM	0 a 10 cm	15.1 ^a
		10 a 20 cm	13.9 ^a
MC	SUS	SA	14.1 ^a
		SF	12.5 ^a
		SP	17.2 ^b
	PM	0 a 10 cm	14.8 ^a
		10 a 20 cm	14.4 ^a
MS		ns	
MC	<i>p-value</i> SUS*PM	ns	

PMP: punto de marchitez permanente; valores medios con una misma letra por SUS o PM no presentan diferencias significativas (Tukey, $\alpha = 0.05$); ns: no significativo ($p\text{-value} > 0.05$). El resto de las abreviaturas como en el Cuadro 2

3.4.7. Humedad aprovechable

En el Cuadro 6 se puede observar que en general los valores medios de humedad aprovechable (HA) en los tres SUS y las dos PM, fueron mayores con el MS en

comparación con el MC, aunque la diferencia mayor entre los valores fue de aproximadamente un punto porcentual.

Existió regularidad en el orden de los valores medios al utilizar el MC y el MS, pues para ambos el orden fue $SP > SA > SF$. Para PM si existió regularidad pues tanto con el MC como con el MS en la PM1 se tuvieron los valores mayores. Con los valores medios de HA de los SF, SA y SP, así como de las PM, los suelos se clasificaron con problemas para suministrar agua a las plantas, según Mukherjee y Lal (2014). Por su parte, Castellanos, Uvalle-Bueno y Aguilar-Santelises (2000) mencionan que los valores obtenidos en el presente estudio son típicos de suelos con texturas franco arenosas.

Se puede observar que de manera general se tienen suelos homogéneos en cuanto a HA con una desviación en el SF debido al contenido de arcilla que fue más bajo y al valor de arena que fue el más alto. Kirkham (2007) y Ortiz-Villanueva y Ortiz-Solorio (1990) mencionan que las concentraciones de MO y la textura del suelo tienen un efecto muy importante en la disponibilidad del agua en el suelo.

Para el MS los valores cumplieron con la condición de normalidad y de homocedasticidad de varianzas y los resultados del ANDEVA indicaron que tanto para los factores como para la interacción no se verificaron diferencias significativas.

Para la MC, los valores cumplieron con la condición de normalidad y de homocedasticidad de varianzas y los resultados del ANDEVA indicaron que se verificaron diferencias significativas ($P < 0.01$) sólo para la interacción. La prueba de Tukey evidenció diferencias significativas en las medias del SP para ambas profundidades, con 14.2 % para la PM1 y 10.0 % para la PM2. Estos valores medios corresponden al promedio de cada combinación de SUS y PM.

De los resultados anteriores se puede afirmar que los valores de HA si fueron afectados por el tipo de muestreo de manera significativa. El orden de los valores en función de los sistemas no fue afectado por el tipo de muestreo. El orden de

los valores en función de las profundidades no fue afectado por el tipo de muestreo. El cumplimiento de la normalidad y homocedasticidad no fue afectado por el tipo de muestreo. Se tuvo efecto de la interacción entre los SUS y las PM sobre la variable PMP sólo en la MC.

Cuadro 6. Valores medios y prueba de Tukey para la HA estudiado en los distintos SUS y PM

MUESTRA	FACTOR		HA
			%
MS	SUS	SA	12.7 ^a
		SF	12.2 ^a
		SP	13.7 ^a
	PM	0 a 10 cm	13.3 ^a
		10 a 20 cm	12.4 ^a
MC	SUS	SA	11.4
		SF	11.3
		SP	12.1
	PM	0 a 10 cm	12.1
		10 a 20 cm	11.1
MS	<i>p-value</i> SUS*PM		ns
MC			0.01

HA: humedad aprovechable; valores medios con una misma letra por SUS o PM no presentan diferencias significativas (Tukey, $\alpha = 0.05$); ^{ns}: no significativo (*p-value* > 0.05). El resto de las abreviaturas como en el Cuadro 2

3.4.8. Estabilidad de agregados

En el Cuadro 7 se puede observar que en general los valores medios de estabilidad de agregados (EA) en los tres SUS y las dos PM, fueron mayores con el MS en comparación con el MC, aunque la diferencia mayor entre los valores fue de más de 16 puntos porcentuales.

Existió regularidad en el orden de los valores medios al utilizar el MC y el MS, pues para ambos el orden fue SP > SA > SF. Para PM si existió regularidad pues tanto con el MC como con el MS en la PM1 se tuvieron los valores mayores. Con

los valores medios de la EA de los SF, SA y SP, así como de las PM, los suelos tienen valores considerados muy altos, según Bartlová, Badalíková, Pospíšilová, Pokorný y Šarapatka (2015).

Se puede observar que de manera general se tienen suelos heterogéneos en cuanto a EA con una desviación en el SA debido a las prácticas mecánicas que se realizan en dicho sistema. De acuerdo con Sustaita-Rivera et al. (2000), las prácticas mecanizadas provocan la desintegración de los agregados, causando una mayor pérdida de la materia orgánica que repercute en la agregación misma. Por su parte, Brady y Weil (1999) mencionan que en regiones muy húmedas, valores elevados de EA pueden deberse a la acción de componentes inorgánicos como los óxidos de hierro que favorecen la agregación de las partículas del suelo.

Para el MS los valores cumplieron con la condición de normalidad y de homocedasticidad de varianzas y los resultados del ANDEVA indicaron que para el factor SUS ($P < 0.05$) al igual que para el factor PM ($P < 0.01$) se verificaron diferencias significativas. La prueba de Tukey en el MS, evidenció que la EA fue significativamente menor en el SA respecto del SP, pero igual que el SF. La EA en la PM1 fue significativamente mayor que en la PM2.

Para el MC, los valores cumplieron con la condición de normalidad y de homocedasticidad de varianzas y los resultados del ANDEVA indicaron que para el factor SUS ($P < 0.001$) al igual que para el factor PM ($P < 0.01$) se verificaron diferencias significativas. La prueba de Tukey en el MC, evidenció que la EA fue significativamente menor en el SA respecto de los SP y SF. La EA en la PM1 fue significativamente mayor que en la PM2.

De los resultados anteriores se puede afirmar que los valores de EA si fueron afectados por el tipo de muestreo de manera no significativa, a excepción del SP que mostró un comportamiento similar en los dos tipos de muestreo. El orden de los valores en función de los sistemas no fue afectado por el tipo de muestreo. El orden de los valores en función de las profundidades no fue afectado por el tipo de muestreo. El cumplimiento de la normalidad y homocedasticidad no fue afectado por el tipo de muestreo. Se tuvo efecto de los diferentes SUS y las PM

sobre la variable EA tanto para el MS como para el MC aunque los efectos fueron diferentes para los SUS, por lo que para esta variable el tipo de muestreo si afecto la significancia de efectos de los SUS.

Cuadro 7. Valores medios y prueba de Tukey para la EA estudiada en los distintos SUS y PM

MUESTRA	FACTOR	EA	
		%	
MS	SUS	SA	75.4 ^a
		SF	81.1 ^{ab}
		SP	82.2 ^b
	PM	0 a 10 cm	83.5 ^a
		10 a 20 cm	75.7 ^b
MC	SUS	SA	65.5 ^a
		SF	80.3 ^b
		SP	81.9 ^b
	PM	0 a 10 cm	80.2 ^a
		10 a 20 cm	71.6 ^b
MS	<i>p-value</i> SUS*PM	ns	
MC		ns	

EA: estabilidad de agregados; valores medios con una misma letra por SUS o PM no presentan diferencias significativas (Tukey, $\alpha = 0.05$); ns: no significativo ($p\text{-value} > 0.05$). El resto de las abreviaturas como en el Cuadro 2

Los valores bajos encontrados en el SA y en la PM2 se deben a una baja concentración de materia orgánica y de cationes intercambiables (e. g. Ca y Mg) en el SA y en la PM2. Abiven, Menasseri y Chenu (2009) mencionan que la textura, la arcilla, los cationes intercambiables, óxidos de aluminio, de hierro y la MO del suelo son las principales propiedades que influyen en la EA.

3.4.9. Conductividad hidráulica saturada

En el Cuadro 8 se puede observar que en general los valores medios de conductividad hidráulica saturada (K_s) en los tres SUS y las dos PM, fueron

mayores con el MC en comparación con el MS, aunque la diferencia mayor entre los valores fue de más de siete puntos porcentuales.

No existió regularidad en el orden de los valores medios al utilizar el MC y el MS, pues para el primero el orden fue $SF > SP > SA$ y para el segundo fue $SP > SF > SA$. Para las PM no existió regularidad pues con el MC la PM2 tuvo el valor mayor, en cambio con el MS la PM1 tuvo el valor mayor. Los valores encontrados en el SA se clasificaron como moderadamente bajos de acuerdo con Castellanos, Uvalle-Bueno y Aguilar-Santelises (2000). Esto se origina por un bajo contenido de materia orgánica, que indudablemente acarrea una serie de problemas de orden físico que deben ser considerados (e. g. compactación).

Se puede observar que de manera general se tienen suelos heterogéneos en cuanto a K_s con una desviación en el SP y SF para la MS y la MC respectivamente. Lo que concuerda con los valores obtenidos en la EA, ya que fueron mejores en estos sistemas y sugieren una mejor estabilidad estructural en estos sistemas.

Para el MS los valores no cumplieron con la condición de normalidad y de homocedasticidad de varianzas, por lo que fue necesario analizarlos mediante la prueba ART ANDEVA y los resultados indicaron que para el factor SUS ($P < 0.01$) al igual que para la interacción ($P < 0.05$) se verificaron diferencias significativas. La prueba de pairwise encontró diferencias significativas en las medias del SA para ambas profundidades, con 2.11 y 3.04 cm h^{-1} en la PM1 y PM2 respectivamente, en las medias del SA y del SP así como entre las medias del SF y del SP para la PM2, con 3.04 y 3.95 cm h^{-1} , 1.96 y 3.95 cm h^{-1} respectivamente.

Para la MC, los valores no cumplieron con la condición de normalidad y de homocedasticidad de varianzas, por lo que fue necesario analizarlos mediante la prueba ART ANDEVA y los resultados no indicaron diferencias significativas para alguno de los factores o su interacción.

De los resultados anteriores se puede afirmar que los valores de K_s si fueron afectados por el tipo de muestreo de manera significativa. El orden de los valores en función de los sistemas si fue afectado por el tipo de muestreo. El orden de los valores en función de las profundidades si fue afectado por el tipo de muestreo. El cumplimiento de la normalidad y homocedasticidad si fue afectado por el tipo de muestreo. Se tuvo efecto de la interacción entre los SUS y las PM sobre la variable K_s para la MS únicamente.

Cuadro 8. Valores medios y prueba de Tukey para la K_s estudiada en los distintos SUS y PM

MUESTRA	FACTOR	K_s cm h ⁻¹	
MS	SUS	SA	2.58
		SF	2.59
		SP	9.92
	PM	0 a 10 cm	7.08
		10 a 20 cm	2.98
MC	SUS	SA	2.89 ^a
		SF	8.67 ^a
		SP	3.96 ^a
	PM	0 a 10 cm	5.01 ^a
		10 a 20 cm	5.33 ^a
MS MC	<i>p-value</i> SUS*PM	0.04 ns	

K_s : conductividad hidráulica saturada; valores medios con una misma letra por SUS o PM no presentan diferencias significativas (Tukey, $\alpha = 0.05$); ns: no significativo ($p\text{-value} > 0.05$). El resto de las abreviaturas como en el Cuadro 2

Figuroa-Jáuregui, Martínez-Menez, Ortiz-Solorio, y Fernández-Reynoso (2018) hallaron valores mayores de K_s muy bajos en suelos agrícolas y de moderadamente altos a bajos en pastizales, lo que concuerda con lo obtenido en este estudio. Kisku, Datta, Basak, y Mandi (2017) reportan un valor mayor de K_s para suelos con manejo agrícola que suelos con manejo forestal, en nuestro caso estos dos sistemas tuvieron valores de K_s muy parecidos. Además, estos autores

mencionan que las variables D_{ap} y los % de arcillas y arenas, son responsables de los diferentes valores que pueda obtener la K_s en SUS distintos.

3.4.10. Comparación entre factores de estudio

En el Cuadro 9 se puede observar que los valores medios de D_{ap} en los sistemas variaron de 1.35 a 1.50 $Mg\ m^{-3}$, debido a que es mejor una D_{ap} menor al denotar una menor compactación, el mejor sistema fue el SA, seguido del SP y en tercer lugar el SF. Para la PT los valores medios en los sistemas variaron de 39.9 a 46.4 %, debido a que es mejor una alta porosidad por propiciar una mayor entrada de agua al sistema, el mejor sistema fue el SA seguido del SF y por último el SP. Para la CC y PMP los valores medios en los sistemas variaron de 23.8 a 29.8 %, y de 14.1 a 17.2 %, respectivamente, debido a que es mejor un valor alto de CC por propiciar una mayor HA en el sistema, el mejor sistema fue el SP seguido del SA y por último el SF. Los valores medios de HA en los sistemas variaron de 11.3 a 13.7 %, debido a que es mejor un valor alto de HA por propiciar una mayor humedad disponible para las plantas, el mejor sistema fue el SP seguido del SA y por último el SF lo que se corresponde con lo afirmado para los valores de CC y PMP. Para la EA los valores medios en los sistemas variaron de 75.4 a 82.2 %, debido a que es mejor una alta EA por propiciar una mayor entrada de agua al sistema y una menor dispersión de los agregados, el mejor sistema fue el SP seguido del SF y por último el SA. Para la K_s los valores medios en los sistemas con variaron de 2.58 a 9.92 %, debido a que es mejor una alta K_s por propiciar una mayor entrada de agua al sistema y un menor escurrimiento, el mejor sistema fue el SP seguido del SF y por último el SA. Para el MS y MC el mejor sistema fue el SP. En el caso de las PM, la PM1 fue mejor que la PM2 en ambos tipos de muestreo.

Se puede concluir de manera general que los tipos de muestreo no afectaron el criterio de mejor sistema desde el punto de vista de los valores más convenientes. Los resultados mostraron que con el MS el SP obtuvo los valores mayores de CC, PMP, HA EA y K_s , con el MC se coincidió en CC, PMP y EA además de PT.

El SA con el MS obtuvo los valores mayores de PT. El SF con el MS y el MC obtuvo los mayores valores de D_{ap} . Se encontraron diferencias estadísticamente significativas para las variables CC y PMP con el MC, y EA para los MS y MC donde el valor medio mayor correspondió en todos los casos al SP. En el caso de las PM los valores mayores de las variables CC, PMP, H.A y EA fueron para la PM1 tanto para el MS como para el MC. La variable D_{ap} manifestó los valores mayores a la PM2 tanto para el MS como para el MC, la K_s manifestó su valor mayor a la PM1 en el MS y a la PM2 en el MC. La única variable que presentó diferencias estadísticamente significativas para la PM fue la EA donde el valor medio mayor correspondió a la PM1 tanto para el MS como para el MC.

Cuadro 9. Valores medios de las variables físicas para los distintos SUS y PM en los diferentes tipos de muestro para su comparación desde el punto de vista agronómico

Variable	SA		SF		SP		PM1		PM2	
	MS	MC								
D_{ap} (Mg m ⁻³)	1.35 ³	1.50 ²	1.46 ¹	1.52 ¹	1.43 ²	1.47 ³	1.40 ²	1.46 ²	1.42 ¹	1.53 ¹
PT (%)	46.4 ³	39.9 ¹	42.3 ¹	40.9 ²	42.8 ²	42.0 ³	43.8 ²	41.9 ²	43.8 ²	39.9 ¹
CC (%)	27.2 ²	25.5 ²	25.1 ¹	23.8 ¹	29.8 ³	29.3 ³	28.4 ²	26.9 ²	26.3 ¹	25.5 ¹
PMP (%)	14.6 ²	14.1 ²	13.0 ¹	12.5 ¹	16.1 ³	17.2 ³	15.1 ²	14.8 ²	13.9 ¹	14.4 ¹
HA (%)	12.7 ²	11.4 ²	12.2 ¹	11.3 ¹	13.7 ³	12.1 ³	13.3 ²	12.1 ²	12.4 ¹	11.1 ¹
EA (%)	75.4 ¹	65.5 ¹	81.1 ²	80.3 ²	82.2 ³	81.9 ³	83.5 ²	80.2 ²	75.7 ¹	71.6 ¹
K_s (cm hr ⁻¹)	2.58 ¹	2.89 ¹	2.59 ²	8.67 ³	9.92 ³	3.96 ²	7.08 ²	5.01 ¹	2.98 ¹	5.33 ²

D_{ap} : densidad aparente; **PT**: porosidad total; **CC**: capacidad de campo; **PMP**: punto de marchitez permanente; **HA**: humedad aprovechable; **EA**: estabilidad de agregados; **K_s** : conductividad hidráulica saturada; **PM1**: profundidad de muestreo de 0 a 10 cm; **PM2**: profundidad de muestreo de 10 a 20 cm; **MS**: muestra simple; **MC**: muestra compuesta; **SA**: sistema agrícola; **SF**: sistema forestal; **SP**: sistema pastizal. Exponentes (^{1,2,3}) denotan conveniencia agronómica sobre los SUS y PM, (a mayor número, mayor conveniencia)

3.5. CONCLUSIONES

Los sistemas de uso del suelo forestal, agrícola y pastizal tuvieron efectos significativos sobre las variables CC y PMP con el MC, y EA para los MS y MC donde el valor medio mayor correspondió en todos los casos al SP.

La única variable que presentó diferencias estadísticamente significativas para la PM fue la EA donde el valor medio mayor correspondió a la profundidad de 0 a 10 cm tanto para el MS como para el MC.

Los métodos de muestreo simple y compuesto no incidieron sobre el cumplimiento de los supuestos de normalidad de datos y homocedasticidad de varianzas de las variables físicas, a excepción de las variables D_{ap} y PT, donde el muestreo compuesto mostró un no cumplimiento de la normalidad y el simple sí.

Los métodos de muestreo simple y compuesto si incidieron en la determinación de la significancia de los efectos de los sistemas de uso de suelo y las profundidades pues afectaron a los valores medios de las variables estudiadas, así como los efectos de interacción.

El sistema de uso de suelo pastizal presentó los valores más convenientes de las variables físicas desde el punto de vista agronómico.

La PM de 0-10 cm en general mostró los mayores valores de las variables físicas tanto para el muestro simple como para el compuesto.

3.6. REFERENCIAS

Abbot, L. K., & Murphy, D. V. (2007). *Soil Biological Fertility: A key to sustainable land use in agriculture* (L. K. Abbott & D. V. Murphy, Eds.). Dordrecht: Springer.

Abiven, S., Menasseri, S., & Chenu, C. (2009). The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability - A literature analysis. *Soil Biology and Biochemistry*, 41(1), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.09.015>

Amézketa, E. (1999). Soil Aggregate Stability: A Review. *Journal of Sustainable Agriculture*, 14(2–3), 83–151. https://doi.org/10.1300/J064v14n02_08

Bartlová, J., Badalíková, B., Pospíšilová, L., Pokorný, E., & Šarapatka, B. (2015). *Water Stability of Soil Aggregates in Different Systems of Tillage*. 3, 147–154.

<https://doi.org/10.17221/132/2014-SWR>

Blake, G. R. (1965). Bulk Density. In C. A. Black (Ed.), *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling* (pp. 374–390). Madison, WI, USA: Am. Soc. Agron.

Blake, G. R., & Hartge, K. H. (1986). Particle Density. In A. Klute (Ed.), *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogy methods* (pp. 377–382). <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c14>

Boley, J. D., Drew, A. P., & Andrus, R. E. (2009). Effects of active pasture, teak (*Tectona grandis*) and mixed native plantations on soil chemistry in Costa Rica. *Forest Ecology and Management*, 257(11), 2254–2261. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.02.035>

Brady, N. C., & Weil, R. R. (1999). *The Nature and Properties of Soils* (12th ed.; P. Education, Ed.). New Jersey, USA.

Cantú Silva, I., Díaz García, K. E., Yáñez Díaz, M. I., González Rodríguez, H., & Martínez Soto, R. A. (2018). Caracterización fisicoquímica de un Calcisol bajo diferentes sistemas de uso de suelo en el noreste de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(49), 59–86.

Carretero, R., Marasas, P. A., Souza, E., & Rocha, A. (2016). Conceptos de utilidad para lograr un correcto muestreo de suelos. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*, 21, 1–11. Retrieved from [http://www.ipni.net/publication/ia-lahp.nsf/0/FD759730AFBB24B685257F86006B8078/\\$FILE/AA-15.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lahp.nsf/0/FD759730AFBB24B685257F86006B8078/$FILE/AA-15.pdf)

Castellanos, J. Z., Uvalle-Bueno, J. X., & Aguilar-Santelises, A. (2000). *Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas* (1st ed.). México, D. F.: INCAPA.

Cruz-Ruiz, E., Cruz-Ruiz, A., Aguilera-Gómez, L. I., Norman-Mondragón, H. T., Velázquez, R. A., Nava-Bernal, G., ... Reyes-Reyes, B. G. (2012). Efecto en las características edáficas de un bosque templado por el cambio de uso de suelo. *Terra Latinoamericana*, 30(2), 189–197.

Daza Torres, M. C., Hernández Flórez, F., & Triana, F. A. (2014). Efecto del Uso del Suelo en la Capacidad de Almacenamiento Hídrico en el Páramo de Sumapaz - Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 67(1), 7189–7200. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v67n1.42642>

Estrada-Herrera, I. R., Hidalgo-Moreno, C., Guzmán-Plazola, R., Almaraz, J. J., Navarro-Garza, H., & Etchevers-Barra, J. D. (2017). Indicadores de calidad de suelo para evaluar su fertilidad. *Agrociencia*, 51(8), 813–831. Retrieved from <http://www.colpos.mx/agrocien/Bimestral/2017/nov-dic/art-1.pdf>

Fernández, P. R., Acevedo, D. C., Villanueva, A., & Uribe, M. (2016). Estado de los elementos químicos esenciales en suelos de los sistemas natural, agroforestal y monocultivo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7(35), 65–77. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/remcf/v7n35/2007-1132-remcf-7-35-00065.pdf>

Figuroa Jáuregui, M. L., Martínez Menez, M. R., Ortiz-Solorio, C. A., &

Fernández Reynoso, D. (2018). Influencia de los factores formadores en las propiedades de los suelos en la Mixteca, Oaxaca, México. *Terra Latinoamericana*, 36, 287–299.

Flores, L., & Alcalá, J. R. (2010). *Manual de procedimientos analíticos. Laboratorio de Física de Suelos* (1st ed.). México, D. F.: Instituto de Geología: Departamento de Edafología, UNAM.

Gee, G. W., & Bauder, J. W. (1986). Particle-size Analysis. In A. Klute (Ed.), *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and minerology methods* (pp. 383–411). <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c15>

Haghighi, F., Gorji, M., & Shorafa, M. (2010). A study of the effects of land use changes on soil physical properties and organic matter. *Land Degradation and Development*, 21(5), 496–502. <https://doi.org/10.1002/ldr.999>

Hernández-González, D. E., Muñoz-Iniestra, D. J., López-Galindo, F., & Hernández-Moreno, M. M. (2018). Impacto del uso de la tierra en la calidad del suelo en una zona semiárida del Valle del Mezquital, Hidalgo, México. *BIOCyT*, 11(43), 792–807.

Hernández, J. O., Gutiérrez, M. del C., Ortiz-Solorio, C. A., Sánchez, P., & Ángeles, E. (2017). Calidad de Andosols en sistemas forestal, agroforestal y agrícola con diferentes manejos en Zacatlán, Puebla. *Terra Latinoamericana*, 35, 179–189. <https://doi.org/https://doi.org/10.28940/terra.v35i2.201>

Hillel, D. (1998). *Environmental soil physics*. San Diego, California: Academic Press.

INEGI. (2001a). Conjunto de datos vectoriales Fisiográficos. Continuo Nacional escala 1:1 000 000 serie I. Provincias fisiográficas. Retrieved February 18, 2019, from <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267575>

INEGI. (2001b). Conjunto de datos vectoriales Fisiográficos. Continuo Nacional escala 1:1 000 000 serie I. Sistema topoformas. Retrieved February 18, 2019, from <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267575>

INEGI. (2001c). Conjunto de datos vectoriales Fisiográficos. Continuo Nacional escala 1:1 000 000 serie I. Subprovincias fisiográficas. Retrieved February 18, 2019, from <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267575>

INEGI. (2019). Mapa Digital de México V6 3.0. Retrieved February 18, 2019, from gaia.inegi.org.mx/

Kassa, H., Dondeyne, S., Poesen, J., Frankl, A., & Nyssen, J. (2017). Impact of deforestation on soil fertility, soil carbon and nitrogen stocks: the case of the Gacheb catchment in the White Nile Basin, Ethiopia. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 247, 273–282. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.06.034>

Khresat, S., Al-Bakri, J., & Al-Tahhan, R. (2008). Impacts of land use/cover change on soil properties in the Mediterranean region of northwestern Jordan. *Land Degradation & Development*, 19(4), 397–407.

<https://doi.org/10.1002/ldr.847>

Khresat, S., Al-Bakri, J., & Al-Tahnan, R. (2008). Impacts of land use/cover change on soil properties in the Mediterranean region of northwestern Jordan. *Land Degradation and Development*, 19(4), 397–407. <https://doi.org/10.1002/ldr.847>

Kirkham, M. B. (2007). Field Capacity, Wilting Point, Available Water, and the Non-Limiting Water Range. *Principles of Soil and Plant Water Relations*, 101–115. <https://doi.org/10.1016/b978-012409751-3/50008-6>

Kisku, T. K., Datta, A., Basak, N., & Mandi, S. (2017). Evaluation of saturated hydraulic conductivity from soil properties in an Inceptisol using different land cover and depths. *Journal of Applied and Natural Science*, 9(3), 1482–1488. <https://doi.org/10.31018/jans.v9i3.1388>

Klute, A., & Dirksen, C. (1986). Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods. In A. Klute (Ed.), *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogy methods* (pp. 687–732). Madison, WI, USA: Agronomy monograph no. 9. ASA-SSSA.

Krasilnikov, P., Gutiérrez-Castorena, M. del C., Ahrens, R. J., Cruz-Gaistardo, C. O., Sedov, S., & Solleiro-Rebolledo, E. (2013). The Soils of Mexico. In *The Soils of Mexico*. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-5660-1>

Lyman, R., & Longnecker, M. (2010). *An Introduction to Statistical Methods and Data Analysis* (6th ed.). Belmont, California: Brooks/Cole, Cengage Learning.

Mangiafico, S. S. (2016). Aligned Ranks Transformation ANDEVA. Retrieved from Summary and analysis of extension program evaluation in R website: <https://rcompanion.org/documents/RHandbookProgramEvaluation.pdf>

Medina-Méndez, J., Volke-Haller, V., González-Ríos, J., Galvis-Spínola, A., Santiago-Cruz, M., & Cortés-Flores, J. (2014). Cambios en las propiedades físicas del suelo a través del tiempo en los sistemas de maíz bajo temporal y mango bajo riego en Luvisoles del estado de Campeche. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 22(2). <https://doi.org/10.19136/era.a22n2.320>

Mukherjee, A., & Lal, R. (2014). *Comparison of Soil Quality Index Using Three Methods*. 9(8). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0105981>

Murray, R. M., Orozco, M. G., Hernández, A., Lemus, C., & Nájera, O. (2014). El sistema agroforestal modifica el contenido de materia orgánica y las propiedades físicas del suelo. *Avances En Investigación Agropecuaria*, 18(1), 23–31. Retrieved from <http://www.redalyc.org/pdf/837/83729789003.pdf>

NOM-021-RECNAT. (2002). *Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis*. México, D. F.: Secretaría de medio Ambiente y Recursos Naturales.

Ortiz-Villanueva, B., & Ortiz-Solorio, C. A. (1990). *Edafología* (7ma. ed.; V. A.

- Gómez Cuevas, Ed.). Chapingo, Méx.: Universidad Autónoma Chapingo.
- Osman, K. T. (2013). *Forest Soils*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-02541-4>
- Rios, E., González-Mora, I. D., Cotler, H., & Pineda, R. (2015). *Suelos, bases para su manejo y conservación* (1st ed.; CECADESU, Ed.). Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/285591406_Suelos_bases_para_su_manejo_y_conservacion
- SMN-CNA. (2019). Información estadística climatológica. Retrieved February 18, 2019, from <https://smn.cna.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>
- Soleimani, A., Mohsen, S., Reza, A., Bavani, M., Jafari, M., & Francaviglia, R. (2019). Influence of land use and land cover change on soil organic carbon and microbial activity in the forests of northern Iran. *Catena*, *177*, 227–237. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.02.018>
- Sustaita-Rivera, F., Ordaz-Chaparro, V., Ortiz-Solorio, C., & de León-González, F. (2000). Cambios en las propiedades físicas de dos suelos de una región semiárida debidos al uso agrícola. *Agrociencia*, *34*(4), 379–386. Retrieved from <http://www.redalyc.org/html/302/30234401/>
- Volverás-Mambuscay, B., Amézquita-Collazos, E., & Campo-Quesada, J. M. (2016). Indicadores de calidad física del suelo de la zona cerealera andina del departamento de Nariño, Colombia. *Corpoica Cienc Tecnol Agropecuaria*, *17*(3), 361–377. https://doi.org/10.21930/rcta.vol17_num3_art:513
- Yáñez, M. I., Cantú, I., & González, H. (2018). Effect of land use change on chemical properties of a vertisol. *Terra Latinoamericana*, *36*, 369–379. <https://doi.org/10.28940/terra.v36i4.349>

4. EFECTO DE TRES SISTEMAS DE PRODUCCIÓN SOBRE EL ESTADO DE LA FERTILIDAD QUÍMICA DEL SUELO⁷

4.1. RESUMEN/ABSTRACT

La fertilidad química del suelo es fundamental para una producción óptima. Los sistemas de uso del suelo pueden modificar de manera positiva o negativa a esta fertilidad. Los objetivos de este estudio fueron determinar la influencia de los sistemas agrícola (SA), forestal (SF) y pastizal (SP) sobre las propiedades químicas de un suelo tropical y ver si el tipo de muestreo incidía sobre el cumplimiento de los supuestos de normalidad de datos y homocedasticidad de varianzas de las variables químicas, así como en la determinación de la significancia de los efectos de los sistemas. Para cumplir los objetivos se realizó un muestreo de suelo a las profundidades de 0 a 10 y 10 a 20 cm obteniéndose 48 muestras de suelo, 24 simples y 24 compuestas. Las determinaciones realizadas fueron pH, pH-KCl, MO, C_{org}, nitrógeno (total, inorgánico, amonio y nitrato), relación C-N, P, K_{int}, Ca_{int} y Mg_{int} intercambiables, CIC, acidez intercambiable, Fe, Cu, Zn, Mn, B y CE. Los resultados mostraron que para ambos tipos de muestreo el SF evidenció una mayor concentración de nitrógeno (inorgánico, amonio y nitrato), Ca_{int} y Mg_{int}. Por su parte, el SP evidenció una mayor concentración de MO, C_{org}, N total, Zn, y un valor mayor de pH y menor de acidez intercambiable. El SA propició valores mayores de concentración para K_{int}, P y Zn. La PM de 0 a 10 cm evidenció valores mayores para la mayoría de las variables. El SP y SF resultaron ser los mejores sistemas para el MS y el MC respectivamente, al tener una mayor cantidad de valores convenientes de las variables. El tipo de muestreo afectó a los valores medios obtenidos para todas las variables. Las variables que cumplieron con los supuestos de normalidad y homocedasticidad de varianzas para ambos tipos de muestras fueron MO, C_{org}, N (total y amonio), K_{int}, Mg_{int}, B y pH-KCl.

Palabras clave: agrícola, fertilidad, hule, pastizal, propiedades químicas

EFFECT OF THREE PRODUCTION SYSTEMS ON THE STATE OF THE CHEMICAL FERTILITY OF THE SOIL

The chemical fertility of the soil is essential for optimal production. Land use systems (LUS) can positively or negatively modify this fertility. The objectives of this study were to determine the influence of agricultural (AS), forestry (FS) and

⁷ Tesis de Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo

Autor: Jorge Luis Nuñez Peñaloza

Director de Tesis: Dr. David Cristóbal Acevedo

grassland (GS) systems on the chemical properties of a tropical soil and see if the type of sampling affected compliance with normality assumptions of the data and the homocedasticity of variances of the chemical variables, as well as in the determination of the importance of the effects of the systems. To meet the objectives, soil sampling was carried out at depths of 0 to 10 and 10 to 20 cm, obtaining 48 soil samples, 24 simple (SS) and 24 composite (CS). The determinations were pH, pH-KCl, organic matter (OM), organic carbon (C_{org}), nitrogen (total, inorganic, ammonium and nitrate), C-N ratio, phosphorus (P), potassium (K_{int}), calcium (Ca_{int}) and magnesium (Mg_{int}), cation exchange capacity (CEC), exchangeable acidity, iron (Fe), copper (Cu), zinc (Zn), manganese (Mn), boron (B) and electrical conductivity (EC). The results showed that for both types of sampling, the FS showed a higher concentration of nitrogen (inorganic, ammonium and nitrate), Ca_{int} and Mg_{int} . For its part, the GS showed a higher concentration of MO, C_{org} , total N, Zn, and a higher pH value and lower exchangeable acidity. The AS led to higher concentration values for K_{int} , P and Zn. The MP from 0 to 10 cm showed higher values for most of the variables. The GS and the FS turned out to be the best systems for the SS and the CS respectively, having a greater amount of convenient values of the variables. The type of sampling affected the average values obtained for all the variables. The variables that met the assumptions of normality and homocedasticity of the variations for both types of samples were MO, C_{org} , nitrogen (total and ammonium), K_{int} , Mg_{int} , B and pH-KCl.

Keywords: agricultural, fertility, rubber, grassland, chemical properties

4.2. INTRODUCCIÓN

La conversión de ecosistemas naturales a sistemas de producción intensivos por el hombre acelera la degradación del suelo. Este proceso, implica cambios en las propiedades químicas del suelo, por el incremento en la mineralización de la materia orgánica (agotamiento) y la disminución de las reservas de los nutrientes en la solución del suelo. Además, suelos con un mayor contenido de arenas en zonas con abundantes precipitaciones presentan un agotamiento similar a lo planteado anteriormente, pero de manera natural. Estos dos factores actúan simultáneamente modificando el estado de las propiedades químicas de un suelo específico, de esta manera, el efecto antropogénico potencializa el agotamiento natural de ese suelo.

La materia orgánica del suelo (o carbono orgánico), pH, fósforo aprovechable, potasio intercambiable, nitrógeno total, conductividad eléctrica, capacidad de intercambio catiónico y nitrógeno mineral son propiedades químicas del suelo frecuentemente analizadas en estudios donde se comparan diferentes sistemas de uso de suelo (Biro, Pradhan, Buchroithner, & Makeschin, 2013; Braimoh & Vlek, 2004; Chen, Zhang, Dong, Wang, & Du, 2010; Khresat, Al-Bakri, & Al-Tahnan, 2008; Yáñez, Cantú, & González, 2018).

Valores óptimos de las propiedades químicas anteriores en los diferentes sistemas de uso de suelo crean una buena fertilidad química en él, definida como la capacidad que tiene un suelo de proporcionar un entorno químico y nutricional adecuado para el crecimiento y desarrollo de las plantas que sobre él crecen (Abbot & Murphy, 2007).

Por otra parte, para determinar las diferencias en los valores de las propiedades químicas cuando se comparan sistemas, se hace uso de la estadística a través de un análisis de varianza (ANDEVA), pero para realizar este análisis, es necesario que el conjunto de datos cumpla con los supuestos de normalidad y homocedasticidad, de no hacerlo, se deberán tomar otras alternativas como la transformación de datos o el uso de pruebas no paramétricas. Zuur, Ieno y Elphick (2010) mencionan que la normalidad de los datos y la homogeneidad de varianzas son dos suposiciones muy importantes en los análisis de varianzas. Cuando alguno de los supuestos falla, se puede optar por transformar los datos o aplicar pruebas no paramétricas para realizar pruebas estadísticas cuya finalidad sea determinar si existe una separación significativa entre grupos (Sokal & Rohlf, 2009; Zuur et al., 2010). Dentro de las pruebas no paramétricas, ART ANDEVA permite realizar análisis factoriales (Wobbrock, Findlater, Gergle, Higgins, & Kay, 2011).

También al realizar el muestreo de suelos para caracterizar los sistemas se tienen las alternativas de tomar muestras compuestas o muestras simples, recomendándose en el caso de análisis de parámetros químicos el tomar muestras compuestas, debido a que se tiene un menor costo por análisis, pero

con la desventaja que no se tiene información sobre cuál es la variación de cada uno de los parámetros del suelo. Por lo anterior es conveniente comparar los dos tipos de muestreo el muestreo simple (MS) y el muestreo compuesto (MC).

Además, es importante determinar si el orden de los valores medios en la comparación del efecto de los sistemas sobre las variables bajo análisis cambia, al tomar muestras compuestas y muestras simples. Relacionado con lo anterior también es interesante determinar si las decisiones estadísticas en relación con los efectos de los sistemas e interacciones cambian en función del método de muestreo.

El objetivo de este estudio fue medir las propiedades químicas de un suelo con los usos agrícola, forestal y de pastizal a dos profundidades para: a) determinar el efecto de los usos y las profundidades sobre las propiedades químicas de un suelo tropical, b) determinar si los métodos de muestreo inciden sobre el cumplimiento de los supuestos de normalidad de datos y homocedasticidad de varianzas de las variables químicas, c) determinar si el método de muestreo incide en la determinación de la significancia de los efectos de los sistemas de uso de suelo y las profundidades, y d) determinar cuál sistema de uso de suelo presenta los valores más convenientes de las variables químicas desde el punto de vista agronómico.

4.3. MATERIALES Y MÉTODOS

4.3.1. Área de estudio

El área de estudio se ubica en el ejido de General Felipe Ángeles, perteneciente al municipio de San Juan Mazatlán en el estado de Oaxaca, en las coordenadas geográficas 17° 20' 35.98" N y 95° 19' 8.11" O, con una altitud de 63 msnm. El ejido forma parte de la provincia fisiográfica Llanura Costera del Golfo Sur, subprovincia Llanura Costera Veracruzana y el relieve se caracteriza por ser lomerío (INEGI, 2001a, 2001c, 2001b). Los tipos de rocas presentes son sedimentarias como la arenisca, conglomerado de la era Cenozoica y caliza de la era Mesozoica, ígneas intrusivas como el granito de la era Paleozoica también

están presentes (INEGI, 2019). La precipitación anual promedio es de 2,020.3 mm año⁻¹, la temperatura promedio oscila entre 20.3 y 30.8 °C con una media de 25.6 °C (Krasilnikov et al., 2013; SMN-CNA, 2019), presentándose un clima cálido húmedo con abundantes lluvias en verano (INEGI, 2019). El mapa de suelos indica la presencia de Luvisoles y Fluvisoles como suelos dominantes (INEGI, 2019).

La vegetación en gran parte de la superficie del ejido consiste principalmente en pastos introducidos como *Brachiaria brizantha* Stapf cv. Marandú destinados a la alimentación del ganado bovino, plantaciones de limón persa (*Citrus latifolia* Tan.) para exportación, cultivos de maíz (*Zea mays* L.) y frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) para autoconsumo y plantaciones forestales comerciales de *Hevea brasiliensis* Muell. Arg. para la obtención de hule (Figura 4). La vegetación forestal nativa consiste en árboles dispersos dentro de las parcelas de los ejidatarios como cedro rojo (*Cedrela odorata* L.), caoba (*Swietenia macrophylla* King), guácimo (*Guazuma ulmifolia* Lam.) y *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb.



Figura 4. (a) Pastizal inducido de *Brachiaria brizantha* Stapf cv. Marandú destinado para la alimentación de ganado bovino, (b) y (c) cultivo de limón persa (*Citrus latifolia* Tan.) para exportación, (d) y (e) plantación forestal de *Hevea brasiliensis* Muell. Arg. para la extracción de hule

4.3.2. Muestreo de suelos y análisis de laboratorio

El muestreo se realizó del 27 al 29 de julio de 2018. Primero se realizó un recorrido para ubicar los sistemas uso de suelo (SUS), tomando como referencia el tipo de suelo dominante (Luvisol umbrihúmico) y los SUS forestal, pastizal y agrícola (Cuadro 10). En cada SUS se establecieron cuatro áreas de muestreo elegidas al azar de 20 x 20 m² de acuerdo con Kassa et al. (2017). Al centro de cada área se tomó una muestra simple (MS) con ayuda de una pala de corte. De igual manera, en cada área se tomaron 16 submuestras para formar una sola muestra compuesta (MC), de acuerdo con el procedimiento de Carretero, Marasas, Souza y Rocha (2016). En total se tomaron 48 muestras de suelo, 24 simples y 24 compuestas, considerando las cuatro áreas, los tres SUS y dos profundidades de muestreo (PM) de 0 a 10 cm (PM1) y de 10 a 20 cm (PM2).

Cuadro 10. Características de los sistemas de uso de suelo elegidos

Establecimiento	Manejo (años)	Uso actual	Localización
1988	30 años	Plantación forestal	17° 21' 20.48" N 95° 20' 20.54" O
1988	25 años	Pastizal	17° 21' 15.40" N 95° 20' 19.89" O
2008	8 años	Agrícola	17° 20' 59.27" N 95° 18' 53.24" O

La elección de las profundidades fue debido a que a éstas, la gran mayoría de nutrimentos y propiedades físicas adquieren los valores más representativos del suelo, y por otro lado a estas profundidades se encuentra la mayor proporción de raíces (Carretero et al., 2016).

Las muestras de suelo fueron transportadas en bolsas de plástico con su respectiva etiqueta de identificación. Las muestras fueron secadas al aire, sin exposición directa a los rayos del sol y extendidas sobre papel estraza (NOM-

021-RECNAT, 2002). Una vez secas, se procedió a molerlas con un mazo de madera y tamizarlas a través de una malla de abertura de 2 mm (Hernández et al., 2017).

Las muestras se secaron al aire y se tamizaron antes de determinar pH en agua y en KCl 1M medido con un potenciómetro en el sobrenadante de una suspensión de una mezcla 1:2.5 suelo:líquido (van Reeuwijk, 2003); carbono orgánico (C_{org}) y materia orgánica (MO) mediante el procedimiento de Walkley & Black (van Reeuwijk, 2003); nitrógeno total (N_t) y nitrógeno inorgánico ($NO_3^- + NH_4^+$) siguiendo la NOM-021-RECNAT (2002); relación C-N (Brady & Weil, 1999), fósforo aprovechable por el método de Bray-P1 (van Reeuwijk, 2003); potasio (K), calcio (Ca) y magnesio (Mg) intercambiables extraídos en acetato de amonio 1N pH 7 y cuantificado en espectrofotometría de emisión de flama para K y absorción atómica para Ca y Mg (van Reeuwijk, 2003); hierro (Fe), cobre (Cu), cinc (Zn) y manganeso (Mn) extraídos en DTPA y cuantificados en espectrofotometría de absorción atómica (NOM-021-RECNAT, 2002); boro (B) extraído con $CaCl_2$ 1M y determinado por fotocolorimetría con azometina H (NOM-021-RECNAT, 2002); capacidad de intercambio catiónico (CIC) se determinó mediante el intercambio con acetato de amonio 1N pH 7 (van Reeuwijk, 2003); conductividad eléctrica (CE) medida con un conductímetro (van Reeuwijk, 2003) ; y acidez intercambiable ($Al^{3+} + H^+$) extraída en una solución de KCl (van Reeuwijk, 2003).

4.3.3. Análisis estadístico

Con la información obtenida se elaboró una base de datos, la cual se analizó y se interpretó con ayuda de pruebas estadísticas. Los datos fueron analizados bajo un diseño factorial 3x2, con cuatro repeticiones; dónde el primer factor correspondió al uso de suelo (SUS), y el segundo factor a la profundidad (PM), así como su interacción (SUS*PM). Se realizaron pruebas de normalidad de Shapiro-Wilk (S-W) y de homocedasticidad de varianzas de Levene (L_t). Posteriormente se realizó un análisis de varianza (ANDEVA) de dos vías con

replicaciones iguales y se hicieron comparaciones de medias de Tukey para determinar diferencias significativas por SUS, PM y SUS*PM. Las variables que no cumplieron los supuestos de normalidad de datos y/o de homocedasticidad de varianzas, se analizaron mediante una prueba no paramétrica, ART ANDEVA (Mangiafico, 2016). En caso de existir diferencia significativa en el factor interacción, los valores medios correspondían al promedio de la variable en las cuatro áreas y las comparaciones de medias se realizaron con la prueba de pairwise. Se empleó el software RStudio para R 3.6.1. La comparación entre los SUS y las PM se evaluó mediante el criterio de “mayor es mejor” donde se agrupan aquellas propiedades donde lo más conveniente para el funcionamiento es que esas propiedades tengan un valor alto y de “menor es mejor” donde lo más conveniente para el funcionamiento es que esas propiedades presenten un valor bajo (Hernández-González, Muñoz-Iniestra, López-Galindo & Hernández-Moreno, 2018).

4.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.4.1. Normalidad de datos y homogeneidad de varianzas

Los resultados de las pruebas de normalidad de datos y homogeneidad de varianzas se presentan en el Cuadro 11. Para la MS, las variables que no cumplieron la prueba de normalidad de datos de Shapiro-Wilk fueron pH, P, CIC, Fe, Zn y CE. Para la MC, las variables que no cumplieron dicho supuesto fueron Ca, Fe y Cu.

Para la MS, la prueba de homogeneidad de varianzas mostró que las variables N_{nitrate} , N_{inorg} y acidez intercambiable no cumplieron dicho supuesto. Para la MC, las variables relación C-N, Zn, Mn y CE fueron las que no cumplieron este supuesto.

En el Cuadro 11 se puede observar que se tuvo diferencias en cuanto al cumplimiento del supuesto de normalidad en función del tipo muestreo, pues para el MS el número de variables que lo cumplieron fue de 15 y de 6 que no lo

cumplieron. En el caso del MC de dio el cumplimiento en 18 variables y el no cumplimiento en 3. De lo anterior se puede afirmar que el tipo de muestreo afecto el cumplimiento del supuesto, tanto en cantidad como en el tipo de variable, pues ninguna de las variables determinada con el muestreo simple y compuesto coincidió en el no cumplimiento

Para el supuesto de homogeneidad de varianzas se observa que el tipo de muestreo afecto en menor grado al número de variables que cumplieron el supuesto, pues para el muestreo simple la que cumplieron fueron 18 y las que no fueron 3 contra el muestreo compuesto donde el cumplimiento del supuesto se dio para 17 y el no cumplimiento fue para 4. De lo anterior se puede afirmar que el tipo de muestreo afecto el cumplimiento del supuesto tanto en cantidad como en el tipo de variable pues ninguna de las variables coincidió en el no cumplimiento tanto para el muestreo simple como para el compuesto

Cuadro 11. Pruebas de normalidad de datos y homogeneidad de varianzas para las variables de estudio

PRUEBA	TM	pH ¹	MO	C _{org}	N _{total}	C-N ²	N _{amonio}	N _{nitrato} ¹
S-W	MS	*	0.15 ^{ns}	0.18 ^{ns}	0.94 ^{ns}	0.98 ^{ns}	0.37 ^{ns}	0.28 ^{ns}
	MC	0.16 ^{ns}	0.07 ^{ns}	0.12 ^{ns}	0.15 ^{ns}	0.96 ^{ns}	0.12 ^{ns}	0.49 ^{ns}
L _t	MS	0.88 ^{ns}	0.84 ^{ns}	0.80 ^{ns}	0.64 ^{ns}	0.08 ^{ns}	0.18 ^{ns}	***
	MC	0.35 ^{ns}	0.67 ^{ns}	0.53 ^{ns}	0.38 ^{ns}	*	0.42 ^{ns}	0.33 ^{ns}

Continuación del Cuadro 11

PRUEBA	TM	N _{inorg} ¹	P ¹	K	Ca ²	Mg	CIC ¹	Fe ^{1,2}
S-W	MS	0.70 ^{ns}	**	0.33 ^{ns}	0.43 ^{ns}	0.13 ^{ns}	*	*
	MC	0.77 ^{ns}	0.50 ^{ns}	0.21 ^{ns}	***	0.12 ^{ns}	0.27 ^{ns}	**
L _t	MS	*	0.89 ^{ns}	0.72 ^{ns}	0.08 ^{ns}	0.25 ^{ns}	0.57 ^{ns}	0.70 ^{ns}
	MC	0.10 ^{ns}	0.38 ^{ns}	0.17 ^{ns}	0.55 ^{ns}	0.18 ^{ns}	0.60 ^{ns}	0.82 ^{ns}

Continuación del Cuadro 11

PRUEBA	TM	Cu ²	Zn ^{1,2}	Mn ²	B	CE ^{1,2}	Acidez ¹	pH-KCl
S-W	MS	0.53 ^{ns}	**	0.05 ^{ns}	0.32 ^{ns}	**	0.68 ^{ns}	0.73 ^{ns}
	MC	***	0.70 ^{ns}	0.33 ^{ns}	0.48 ^{ns}	0.88 ^{ns}	0.99 ^{ns}	0.05 ^{ns}

L _t	MS	0.71 ^{ns}	0.35 ^{ns}	0.09 ^{ns}	0.67 ^{ns}	0.64 ^{ns}	*	0.44 ^{ns}
	MC	0.33 ^{ns}	**	***	0.39 ^{ns}	***	0.68 ^{ns}	0.87 ^{ns}

S-W: Shapiro-Wilk; L_t: Levene; FV: fuente de variación; TM: tipo de muestra; MS: muestra simple; MC: muestra compuesta; *: diferencias moderadamente significativas (P < 0.05); **: diferencias fuertemente significativas (P < 0.01); ***: diferencias muy fuertemente significativas (P < 0.001); ^{ns}: no significativo; ¹ART ANDEVA en la MS y ²ART ANDEVA en la MC

4.4.2. Análisis de varianza

Los resultados del ANDEVA y ART ANDEVA se presentan en el Cuadro 12. El ANDEVA mostró para el factor SUS, diferencias significativas en la MS para las variables N_{total}, N_{amonio} y Mg. En la MC para las variables MO, C_{org}, N_{amonio} y Mg. Para el factor PM, el ANDEVA mostró diferencias significativas en la MS para las variables MO, C_{org}, N_{total}, K y Mg. En la MC para las variables MO, C_{org}, N_{total}, N_{amonio}, K y Mg. Para el caso de la interacción, el ANDEVA mostró diferencias en la MS sólo para la variable N_{total}. En la MC para las variables MO, C_{org}, N_{total} y N_{amonio}.

El ART ANDEVA mostró para el factor SUS, diferencias significativas en la MS para las variables pH, N_{inorg}, P, CE y acidez intercambiable. En la MC para las variables pH, N_{inorg}, P, Fe, Cu, Zn, CE y acidez intercambiable. Para el factor PM, el ART ANDEVA mostró diferencias significativas en la MS para las variables P, Ca, Fe, Zn y CE. En la MC para las variables relación C-N, N_{inorg}, Ca, Fe, Cu y Zn. Para el caso de la interacción, el ART ANDEVA no mostró diferencias en alguna de las variables. En la MC la situación fue diferente, pues N_{inorg} y Ca fueron las variables que mostraron significancia estadística para la interacción.

En el Cuadro 12 se puede observar que se tuvieron diferencias en el efecto significativo de los SUS sobre las variables químicas en función del tipo muestreo, pues para el MS el número de variables sobre las que se tuvo efecto fue de 8 y de 13 sobre las que no se tuvo efecto. En el caso del MC se tuvo efecto sobre 13 y 8 sobre las que no se tuvo efecto.

Para el efecto de las PM se observa que no se tuvieron diferencias significativas de las PM sobre las variables químicas en función del tipo muestreo, pues para

el MS el número de variables sobre las que se tuvo efecto fue de 12 y 9 sobre las que no se tuvo efecto. En el caso del MC el comportamiento fue el mismo (12 y 9, respectivamente).

Para el efecto de la interacción SUS*PM se observa que se tuvieron diferencias en cuanto al efecto significativo en función del tipo muestreo, pues para el MS el número de variables sobre las que se tuvo efecto fue de 1 y 20 sobre las que no se tuvo efecto. En el caso del MC se tuvo efecto sobre 6 y 15 no.

De lo anterior se puede afirmar que el tipo de muestreo afectó el efecto de los SUS sobre las variables de respuesta. En el caso de las PM el tipo de muestreo no afectó el efecto. Para las interacciones el tipo de muestreo sí afectó su número. También se tuvo coincidencia del MS y el MC sobre el efecto de los SUS y PM sobre algunas de las variables químicas analizadas.

Cuadro 12. Resultados del análisis de varianza (ANDEVA) para las variables estudiadas

FV	TM	pH	MO	C _{org}	N _{total}	C-N	N _{amonio}	N _{nitro}
SUS	MS	**	0.36 ^{ns}	0.37 ^{ns}	*	0.26 ^{ns}	**	0.06 ^{ns}
	MC	***	*	*	0.67 ^{ns}	0.05 ^{ns}	**	0.12 ^{ns}
PM	MS	0.81 ^{ns}	*	*	*	0.22 ^{ns}	0.46	0.80 ^{ns}
	MC	0.49 ^{ns}	***	***	**	*	**	0.26 ^{ns}
SUS*PM	MS	0.52 ^{ns}	0.23 ^{ns}	0.21 ^{ns}	*	0.64 ^{ns}	0.13	0.72 ^{ns}
	MC	0.06 ^{ns}	**	**	*	0.09 ^{ns}	*	0.08 ^{ns}

Continuación del Cuadro 12

FV	TM	N _{inorg}	P	K	Ca	Mg	Fe	Cu
SUS	MS	*	***	0.69 ^{ns}	0.06 ^{ns}	*	0.06 ^{ns}	0.22 ^{ns}
	MC	*	***	0.34 ^{ns}	**	***	*	**
PM	MS	0.54 ^{ns}	*	**	**	**	**	0.07 ^{ns}
	MC	*	0.12 ^{ns}	***	***	***	**	*
SUS*PM	MS	0.30 ^{ns}	0.66 ^{ns}	0.13 ^{ns}	0.57 ^{ns}	0.61 ^{ns}	0.14 ^{ns}	0.35 ^{ns}
	MC	*	0.48 ^{ns}	0.38 ^{ns}	*	0.05 ^{ns}	0.13 ^{ns}	0.10 ^{ns}

Continuación del Cuadro 12

FV	TM	Zn	Mn	B	CE	Acidez	CIC	pH-KCl
SUS	MS	0.74 ^{ns}	0.25 ^{ns}	0.11 ^{ns}	*	*	0.68 ^{ns}	0.84 ^{ns}
	MC	**	0.13 ^{ns}	0.12 ^{ns}	**	**	0.29 ^{ns}	0.44 ^{ns}
PM	MS	***	0.19 ^{ns}	0.85 ^{ns}	*	0.48 ^{ns}	0.99 ^{ns}	0.55 ^{ns}
	MC	***	0.28 ^{ns}	0.42 ^{ns}	0.12 ^{ns}	0.54 ^{ns}	0.78 ^{ns}	0.90 ^{ns}
SUS*PM	MS	0.63 ^{ns}	0.95 ^{ns}	0.42 ^{ns}	0.09 ^{ns}	0.28 ^{ns}	0.93 ^{ns}	0.65 ^{ns}
	MC	0.13 ^{ns}	0.94 ^{ns}	0.35 ^{ns}	0.72 ^{ns}	0.81 ^{ns}	0.91 ^{ns}	0.59 ^{ns}

FV: fuente de variación; SUS: sistema de uso de suelo; PM: profundidad de muestreo; TM: tipo de muestra; MS: muestra simple; MC: muestra compuesta; *: diferencias moderadamente significativas ($P < 0.05$); **: diferencias fuertemente significativas ($P < 0.01$); ***: diferencias muy fuertemente significativas ($P < 0.001$) y ^{ns}: no significativo.

4.4.3. Valores medios, convenientes y prueba de Tukey

4.4.3.1. Materia orgánica y carbono orgánico

En la MC y la MS, el comportamiento de la concentración de MO y de C_{org} se ordenó $SP > SA > SF$. En la PM1 se tuvo la concentración mayor de MO y de C_{org} en ambos tipos de muestras (Cuadro 13). De acuerdo a los valores medios de MO de los SF, SA, SP y las PM, los suelos se clasifican con contenidos medios, de acuerdo con la NOM-021-RECNAT (2002). El C_{org} de los SF, SA y SP, así como de las PM se clasifica como moderado, de acuerdo con Amacher, Neill y Perry (2007).

Podemos afirmar que de manera general se tuvieron suelos heterogéneos en cuanto a MO y C_{org} con una desviación en el SP cuya concentración fue más alta. La concentración de MO y C_{org} fue significativamente menor en la PM2, cuya diferencia respecto a los valores reportados para la PM1 fue del orden del 27% para la MS.

La prueba de Tukey en la MC para la MO, evidenció diferencias significativas en las medias del SP en la PM2 con 1.51 % y las medias en el SA y el SF para la PM2 con 1.68 y 1.82 % respectivamente; así como también con la media en el SP en la PM1 con 3.69 % respectivamente. De igual manera, hubo diferencias entre la media del SA para la PM1 con 1.92 % y las medias en los SP y SA para

la PM1 y la PM2 respectivamente. La prueba de Tukey en la MC para el C_{org}, evidenció diferencias significativas para los mismos SUS en las mismas PM.

A medida que cambiamos a un manejo más intensivo y en profundidad del suelo, los valores de MO y por ende, de C_{org}, comienzan a disminuir significativamente (Alejo-Santiago et al., 2012; Gmach et al., 2018; Kassa, Dondeyne, Poesen, Frankl, & Nyssen, 2017; Qi et al., 2018).

Araujo et al. (2005) encontró para cuatro SUS y dos PM, que el C_{org} se comporta siguiendo el siguiente orden (mayor a menor concentración) para SUS: vegetación nativa > agrícola > pastizal > plantación de hule y para PM 0 a 15 cm > 35 a 50 cm, Cantú et al. (2018) encontró para el incremento de 0 a 5 cm el siguiente comportamiento: vegetación nativa > pastizal > agrícola y Palma-López et al. (2015) encontró el siguiente comportamiento: vegetación secundaria (acahual) > plantación comercial (*Eucalyptus grandis*) > pastizal y para PM 0 a 10 cm > 10 a 30 cm. En esta investigación, el SP tuvo el potencial de incrementar las concentraciones de C_{org} y por lo consiguiente de MO, como lo señala Paustian et al. (2016).

Cuadro 13. Valores medios, prueba de Tukey y valores más convenientes para materia orgánica (MO) y carbono orgánico (C_{org})

TM	Variable	MS	MC	MS	MC
		MO		C _{org}	
		%			
SUS	SA	2.10 ^{a(i)}	1.80 ⁽⁻⁾	1.23 ^{a(i)}	1.04 ⁽⁻⁾
	SF	2.07 ^{a(-)}	2.14 ⁽ⁱ⁾	1.19 ^{a(-)}	1.24 ⁽ⁱ⁾
	SP	2.47 ^{a(+)}	2.60 ⁽⁺⁾	1.43 ^{a(+)}	1.50 ⁽⁺⁾
PM (cm)	0 a 10	2.56 ^{a(+)}	2.69 ⁽⁺⁾	1.47 ^{a(+)}	1.55 ⁽⁺⁾
	10 a 20	1.87 ^{b(-)}	1.67 ⁽⁻⁾	1.09 ^{b(-)}	0.97 ⁽⁻⁾

TM: tipo de muestra; SUS: sistema de uso de suelo; PM: profundidad de muestreo; SA: sistema agrícola; SF: sistema forestal; SP: sistema pastizal; (-): valor menos conveniente; (+): valor más conveniente; (i): valor de conveniencia intermedia, medias con la misma letra no son diferentes estadísticamente (P < 0.05).

4.4.3.2. pH y pH-KCl

En el Cuadro 14 se puede observar que en general los valores medios de pH en los tres SUS y las dos PM, fueron mayores con el MS en comparación con el MC, aunque la diferencia mayor entre los valores fue de dos décimas.

Existió regularidad en el orden de los valores medios al utilizar el MC y el MS, pues para ambos el orden fue SP > SF > SA. Para las PM si existió regularidad pues tanto con el MC como con el MS en la PM1 se tuvieron los valores mayores. Con los valores medios de pH de los SF, SA y SP en ambas profundidades, los suelos se clasificaron como moderadamente ácidos (SF y SP) y fuertemente ácidos (SA) para ambos tipos de muestra, según Horneck, Sullivan, Owen y Hart (2011).

Para el pH-KCl el comportamiento fue diferente pues los SUS y las PM tuvieron valores iguales a excepción del SA en el MC. Utilizando los valores medios de pH-KCl de los SF, SA y SP los suelos se clasificaron, según Horneck, Sullivan, Owen y Hart (2011) como fuertemente ácidos.

Se puede observar que de manera general se tuvieron suelos homogéneos en cuanto a pH-KCl, con una ligera desviación en el SA para el pH, cuyo valor fue más bajo. Estos valores resultan por las altas precipitaciones que lixivian gran parte de los cationes, dejando el complejo de intercambio dominado por los cationes de Al^{3+} y H^+ (Brady & Weil, 1999). El SA está en desventaja en comparación de los SP y SF debido a su pH más bajo.

La prueba de Tukey para el pH en los distintos SUS mostró que el pH fue significativamente menor en el SA respecto de los SF y SP, los cuáles presentaron valores superiores a este sistema, en la MS el SF y el SP no mostraron diferencia significativa a diferencia de la MC. El SA presentó el valor más bajo debido principalmente al lavado de bases y al uso continuo de fertilizantes amoniacales como lo reportan Fageria y Nascente (2014) y Benítez (2016).

Fernández et al. (2016) encontraron valores de concentración de pH menores en sistemas naturales y sistemas agrícolas tradicionales, lo atribuyen al efecto de la

MO cuando se mineraliza, a esta misma conclusión llegan Hernández et al. (2017) en suelos formados en condiciones de clima templado y Yáñez et al. (2018) reportan concentraciones de pH para suelos alcalinos, mayores en sistemas agrícolas que en sistemas naturales y de pastizal, afectados por la presencia de carbonatos en el suelo, en esta investigación los valores de concentración obtenidos son producto de la influencia del ambiente debido a una excesiva precipitación y al efecto de los fertilizantes como se señaló anteriormente. Para el caso del pH-KCl, los resultados obtenidos son producto de una disminución en el pH de hasta de 1.5 unidades respecto a los valores obtenidos al medir el pH en agua (NOM-021-RECNAT, 2002), para los tres SUS y las dos PM los valores fueron muy parecidos y van desde fuertemente, muy fuertemente y extremadamente ácidos según la clasificación de Osman (2013b).

Cuadro 14. Valores medios, prueba de Tukey y valores más convenientes para las variables pH y pH-KCl

TM	Variable	MS	MC	MS	MC
		pH		pH-KCl	
		adm			
SUS	SA	4.9 ^a (-)	4.7 ^a (-)	4.1 ^a	4.0 ^a
	SF	5.2 ^{ab} (i)	5.1 ^b (i)	4.1 ^a	4.1 ^a
	SP	5.3 ^b (+)	5.4 ^c (+)	4.1 ^a	4.1 ^a
PM (cm)	0 a 10	5.2 ^a (+)	5.1 ^a (+)	4.1 ^a	4.1 ^a
	10 a 20	5.1 ^a (-)	5.0 ^a (-)	4.1 ^a	4.1 ^a

Como en el Cuadro 13

4.4.3.3. Nitrógeno total

En la MS, el comportamiento de la concentración de N_{total} se ordenó $SP > SA > SF$. En la MC, el compartimiento fue ligeramente diferente siendo $SP \approx SA > SF$. En la PM1 se tuvo la concentración mayor de N_{total} en ambos tipos de muestras. Utilizando los valores medios de N_{total} de los SF, SA y SP los suelos se clasifican como medios, sólo en la MS el SF tuvo una concentración baja, esto de acuerdo con la NOM-021-RECNAT (2002). En el caso de las PM, se tuvo una concentración media (Cuadro 15).

Podemos afirmar que de manera general se tienen suelos heterogéneos para N_{total} . En la MS, la concentración de N_{total} fue estadísticamente mayor en el SP para la PM1 (0.13 %) respecto de la concentración en el SF para las PM1 (0.10 %) y PM2 (0.10 %), así como en el SP para la profundidad de PM2 (0.08 %). En la MC, la concentración de N_{total} fue estadísticamente mayor en el SP para la PM1 (0.13 %) respecto de la concentración en el SP para la PM2 (0.08 %).

Varios estudios han demostrado el efecto de diferentes SUS y PM sobre la concentración de N_{total} . Fernández et al. (2016) encontraron mayores contenidos de N_{total} en horizontes superficiales al comparar varios sistemas de uso de suelo, esta condición la atribuyen a los valores de concentración elevados de MO en los primeros centímetros del suelo, por su parte Hajabbasi, Jalalian y Karimzadeh (1997) reportaron similares concentraciones entre sistemas agroforestales y sistemas agrícolas, Kassa et al. (2017) encontraron que los sistemas agroforestales y sistemas forestales son los que presentan similares concentraciones, una condición extraordinaria fue reportada por Khresat, Al-Bakri y Al-Tahnan (2008) dónde no encontraron diferencias significativas en la concentración entre sistemas forestales y sistemas agrícolas, debido a los bajos contenidos de MO encontrados en ambos sistemas, y finalmente Qi et al. (2018) reportan concentraciones mayores para sistemas agrícolas que para sistemas forestales debido principalmente al continuo aporte de abonos orgánicos y a la descomposición del rastrojo de maíz.

Cuadro 15. Valores medios y más convenientes para nitrógeno total (N_{total})

TM Variable		MS	MC
		N_{total} %	
SUS	SA	0.12 ⁽ⁱ⁾	0.11 ⁽⁺⁾
	SF	0.09 ⁽⁻⁾	0.10 ⁽⁻⁾
	SP	0.13 ⁽⁺⁾	0.11 ⁽⁺⁾
PM (cm)	0 a 10	0.13 ⁽⁺⁾	0.12 ⁽⁺⁾
	10 a 20	0.10 ⁽⁻⁾	0.10 ⁽⁻⁾

TM: tipo de muestra; SUS: sistema de uso de suelo; PM: profundidad de muestreo; SA: sistema agrícola; SF: sistema forestal; SP: sistema pastizal; (-): valor menos conveniente; (+): valor más conveniente; (i): valor de conveniencia intermedia

4.4.3.4. Nitratos

En el Cuadro 16 se puede observar que, para la MS y la MC, el comportamiento de la concentración de N_{nitrato} se ordenó $SF > SP > SA$. La PM1 tuvo las concentraciones mayores de N_{nitrato} en ambos tipos de muestra. Podemos afirmar que de manera general se tienen suelos heterogéneos para N_{nitrato} , con una desviación en el SF cuyas concentraciones fueron más altas. Gong et al. (2006) encontró diferencias significativas para N_{nitrato} y no para N_{amonio} en un ambiente con menos precipitación, lo que explica que estas formas químicas deben su concentración a la cantidad de lluvia que cae en un lugar determinado.

Cuadro 16. Valores medios, prueba de Tukey y valores más convenientes para nitrato (N_{nitrato})

TM	Variable	MS	MC
		N_{nitrato}	
		mg kg ⁻¹	
SUS	SA	1.35 ^{a (-)}	1.81 ^{a (-)}
	SF	4.31 ^{a (+)}	4.19 ^{a (+)}
	SP	1.81 ^{a (i)}	3.68 ^{a (i)}
PM (cm)	0 a 10	2.60 ^{a (+)}	3.77 ^{a (+)}
	10 a 20	2.38 ^{a (-)}	2.68 ^{a (-)}

Como en el Cuadro 13

4.4.3.5. Nitrógeno inorgánico y amonio

Para la MS y la MC, el comportamiento de la concentración de N_{inorg} y N_{amonio} se ordenó $SF > SP > SA$. Fue en la PM1 donde se tuvo la concentración mayor de N_{inorg} en ambos tipos de muestras. Utilizando los valores medios de N_{inorg} de los

SF, SA y SP los suelos se clasifican como bajos, el SA en ambos tipos de muestra presentó las concentraciones más bajas, esto de acuerdo con la NOM-021-RECNAT (2002). La PM1 tuvo las concentraciones mayores de N_{inorg} y N_{amonio} en ambos tipos de muestra (Cuadro 17).

Se puede afirmar que la diferencia mayor en cuanto a concentraciones de N_{inorg} y N_{amonio} se dio en N_{inorg} que en el SF fue de 15.28 mg kg^{-1} y en los SA y SP fue de 7.28 mg kg^{-1} y 9.94 mg kg^{-1} respectivamente para la MS. Estas concentraciones pueden impactar en el desarrollo de las plantas en todos los SUS, tal y como lo señala Osman (2013b).

Podemos afirmar que de manera general se tienen suelos heterogéneos para N_{inorg} y N_{amonio} , con una desviación en el SF cuyas concentraciones de N_{inorg} y N_{amonio} fueron más altas.

Para la MS, la concentración de N_{inorg} fue estadísticamente mayor en el SF que en el SA, pero estos dos no difirieron significativamente de la concentración en el SP. La prueba de Tukey en la MC para la concentración de N_{inorg} , evidenció diferencias significativas en las medias del SP en la PM1 con 20.20 mg kg^{-1} y las medias en el SA y el SP para la PM2 con 8.62 y 7.33 mg kg^{-1} respectivamente, así como en la media del SA para la PM1 con 6.85 mg kg^{-1} . Para la MS, los resultados de la prueba de Tukey para el N_{amonio} en los distintos SUS mostró que la concentración de N_{amonio} fue significativamente menor en el SA respecto al SF, pero igual que en el SP. Este comportamiento fue similar al obtenido para el N_{inorg} . La prueba de Tukey en la MC para el N_{amonio} , evidenció diferencias significativas en las medias del SF en la PM1 con 13.60 mg kg^{-1} y la media en el SA para la PM1 con 5.70 mg kg^{-1} , así como en las medias del SA y del SP para la PM2 con 6.15 y 5.70 mg kg^{-1} respectivamente, de igual manera en las medias del SP para la PM1 con 14.47 mg kg^{-1} y las medias del SA y del SP en la PM2, así como en la media del SA para la PM1.

Hubo una concentración mayor de amonio que de nitratos debido probablemente a la relativa afinidad de las arcillas presentes (con mayor proporción de carga negativa dependiente del pH) por el NH_4^+ , dejando al NO_3^- sin ser adsorbido y

moviéndolo a través del perfil del suelo por el movimiento del agua (Brady & Weil, 1999; Osman, 2013). Fernández et al. (2016) encontró una mayor concentración de N_{inorg} en SUS menos perturbados como el bosque y a medida que aumentaba la PM, las concentraciones de N_{inorg} empezaban a disminuir, lo que concuerda con los resultados encontrados en este estudio. Benítez (2016) reporta concentraciones deficientes de N_{inorg} en SUS de monocultivo y agroforestal en suelos cercanos al área de estudio.

Cuadro 17. Valores medios, prueba de Tukey (solo en la MS) y valores más convenientes para amonio (N_{amonio}) y nitrógeno inorgánico (N_{inorg})

TM	Variable	MS	MC	MS	MC
		N_{amonio}		N_{inorg}	
mg kg ⁻¹					
SUS	SA	5.93 ^{a (+)}	5.93 ⁽⁺⁾	7.28 ^{a (-)}	7.74 ⁽⁻⁾
	SF	10.96 ^{b (-)}	11.20 ⁽⁻⁾	15.28 ^{b (+)}	15.39 ⁽⁺⁾
	SP	8.13 ^{ab (i)}	10.09 ⁽ⁱ⁾	9.94 ^{ab (i)}	13.76 ⁽ⁱ⁾
PM (cm)	0 a 10	8.78 ^{a (-)}	11.26 ⁽⁻⁾	11.38 ^{a (+)}	15.03 ⁽⁺⁾
	10 a 20	7.90 ^{a (+)}	6.88 ⁽⁺⁾	10.28 ^{a (-)}	9.57 ⁽⁻⁾

Como en el Cuadro 13 (MS) y Cuadro 15 (MC)

4.4.3.6. Relación C-N

En la MS, el comportamiento de la relación C-N se ordenó SF > SP > SA. En la MC, el compartimiento fue ligeramente diferente siendo SP > SF > SA. En la PM1 se tuvo la relación mayor de C-N en ambos tipos de muestras (Cuadro 18). Utilizando los valores medios de relación C-N de los SF, SA y SP los suelos presentaron una mineralización de nitrógeno, según Mullen (2011). En el caso de las PM, presentaron la misma condición.

Podemos afirmar que de manera general se tienen suelos homogéneos en cuanto a relación C-N con una ligera desviación en el SF y SP cuya relación C-N fueron más altas. A medida que se migra a un uso más intensivo y a una mayor

profundidad del suelo, la relación C-N tiende a disminuir debido a las altas tasas de nitrificación en el suelo (Brady & Weil, 1999; Osman, 2013). Una relación C-N baja indica que el suelo es fértil y que el crecimiento de las plantas no se verá obstaculizado. Un aumento en la relación C-N dentro del SF es debido al aporte de residuos de los árboles de *Hevea brasiliensis* y el cese de la fertilización con N, cómo lo verificó Rytter (2016) con árboles de la familia *Salicaceae* al plantarlos en áreas agrícolas.

Para la MC, la relación C-N en la PM1 fue significativamente mayor que la relación C-N en la PM2, debido probablemente a la mayor acumulación de MO recalcitrante. Abera y Belachew (2011) encontraron que la relación C-N es mayor en los primeros centímetros del suelo, y que además los bosques y pastizales tienden a tener mayores valores de relación C-N.

Cuadro 18. Valores medios, prueba de Tukey y valores más convenientes para C-N

TM	Variable	MS	MC
		C-N	
		mg kg ⁻¹	
SUS	SA	10 ^{a (+)}	10 ^{a (+)}
	SF	13 ^{a (-)}	12 ^{a (i)}
	SP	12 ^{a (i)}	13 ^{a (-)}
PM (cm)	0 a 10	13 ^{a (-)}	13 ^{a (-)}
	10 a 20	11 ^{a (+)}	10 ^{b (+)}

Como en el Cuadro 13

4.4.3.7. Potasio y magnesio

En la MS, el comportamiento de la concentración de K_{int} se ordenó SA > SP > SF. En la MC, el compartimiento fue ligeramente diferente para K_{int} siendo SA > SF > SP. En la MC y la MS, el comportamiento de la concentración Mg_{int} se ordenó SF > SP > SA. En la PM1 se tuvo la mayor concentración de K_{int} y Mg_{int} para ambos tipos de muestras (Cuadro 19).

Se puede afirmar que la diferencia mayor en cuanto a K_{int} y Mg_{int} se dio en la concentración de Mg para la MS, ya que en el SF fue de $0.60 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ y en los SA y SP fue de 0.27 y $0.53 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ respectivamente. Esto puede impactar en el valor de otras variables tanto físicas como químicas. Utilizando los valores medios de concentración de K y Mg de los SF, SA y SP los suelos se clasificaron como bajos y muy bajos, de acuerdo con la NOM-021-RECNAT (2002). En el caso de las profundidades, sólo en la PM1 el K_{int} mostró una concentración media.

Podemos afirmar que de manera general se tienen suelos heterogéneos en cuanto a Mg_{int} pero homogéneos en cuanto a K_{int} , con una desviación en el SF cuya concentración fue más alta para el Mg_{int} pero menor para el K_{int} . Las concentraciones bajas encontradas se deben principalmente al movimiento de los cationes de la solución del suelo a través del perfil (lixiviación) debido a las precipitaciones abundantes y a la escasa afinidad de las arcillas por estos cationes (Bautista, J. Zinck, & Cram, 2010; Brady & Weil, 1999; Krasilnikov et al., 2013; Osman, 2013).

Los resultados de la prueba de Tukey para el K_{int} en las distintas PM mostraron que la concentración fue significativamente mayor en la PM1 respecto de la PM2, para ambos tipos de muestra. Los resultados de la prueba de Tukey para el Mg_{int} en los distintos SUS mostraron que la concentración fue significativamente menor en el SA respecto de las concentraciones en el SF y SP para la MC. En la MS, la concentración en el SA fue significativamente menor que la concentración en el SF, pero igual que la concentración en el SP. En la PM1 se tuvo una concentración significativamente mayor que en la PM2, esto sucedió para ambos tipos de muestra.

Benítez (2016) reportó concentraciones altas de K_{int} y Mg_{int} en suelos sometidos a monocultivo y sistemas agroforestales cercanos al sitio de estudio. Esta última condición la atribuyen al efecto de la cercanía con un río que al desbordarse fertiliza de manera natural las zonas de cultivo aledañas a este. Fernández et al. (2016) encontraron mayores concentraciones de K_{int} y Mg_{int} en horizontes

superficiales de suelos con sistemas de producción de café, lo que concuerda con los resultados obtenidos en este estudio. La disponibilidad de estos cationes se encuentra muy relacionada con los contenidos de MO, ya que ésta disminuye al aumentar la PM al igual que los contenidos de estos nutrimentos, lo que concuerda con lo reportado por Kassa et al. (2017) y Soleimani et al. (2019).

Cuadro 19. Valores medios, prueba de Tukey y valores más convenientes para potasio (K_{int}) y magnesio (Mg_{int}) intercambiables

TM	Variable	MS	MC	MS	MC
		K_{int}		Mg_{int}	
cmol _c kg ⁻¹					
SUS	SA	0.29 ^{a (+)}	0.29 ^{a (+)}	0.27 ^{a (-)}	0.31 ^{a (-)}
	SF	0.26 ^{a (-)}	0.28 ^{a (i)}	0.60 ^{b (+)}	0.53 ^{b (+)}
	SP	0.28 ^{a (i)}	0.25 ^{a (-)}	0.53 ^{ab (i)}	0.51 ^{b (i)}
PM (cm)	0 a 10	0.32 ^{a (+)}	0.32 ^{a (+)}	0.62 ^{a (+)}	0.59 ^{a (+)}
	10 a 20	0.23 ^{b (-)}	0.22 ^{b (-)}	0.31 ^{b (-)}	0.31 ^{b (-)}

Como en el Cuadro 13

4.4.3.8. Calcio

En la MC y la MS, el comportamiento de la concentración de Ca_{int} se ordenó SF > SP > SA. En la PM1 se tuvo la mayor concentración de Ca_{int} para ambos tipos de muestras. Podemos afirmar que de manera general se tienen suelos heterogéneos en cuanto a Ca_{int} , con una desviación en el SF cuya concentración fue más alta (Cuadro 20).

Los resultados de la prueba de pairwise para el Ca_{int} en los distintos SUS y las PM para la MC mostró diferencias significativas entre las medias del SA para la PM1 (0.28 cmol kg⁻¹) respecto de las concentraciones en los SF para la PM1 (0.56 cmol kg⁻¹) y para los SA y SP para la PM2 (0.21 y 0.35 cmol kg⁻¹, respectivamente. De igual manera, la concentración de Ca_{int} fue diferente significativamente entre las medias del SF para la PM2 (0.27 cmol kg⁻¹) respecto de la concentración en los SF para la PM1 y el SA para la PM2. En la MS, la

concentración de Ca_{int} fue significativamente mayor en la PM1 respecto de la PM2.

Cuadro 20. Valores medios, prueba de Tukey (solo para la MS) y valores más convenientes para calcio (Ca_{int}) intercambiable

TM	Variable	MS	MC
		Ca_{int}	
		cmol _c kg ⁻¹	
SUS	SA	0.26 ^{a (-)}	0.24 ⁽⁻⁾
	SF	0.45 ^{a (+)}	0.41 ⁽⁺⁾
	SP	0.36 ^{a (i)}	0.40 ⁽ⁱ⁾
PM (cm)	0 a 10	0.46 ^{a (+)}	0.43 ⁽⁺⁾
	10 a 20	0.26 ^{b (-)}	0.28 ⁽⁻⁾

Como en el Cuadro 13 (MS) y Cuadro 15 (MC)

4.4.3.9. Capacidad de intercambio catiónico y acidez intercambiable

En la MS, el comportamiento de la CIC se ordenó SP > SA = SF. En la MC, la CIC fue SA > SP > SF. En la MC y la MS, el comportamiento de la acidez intercambiable se ordenó SA > SF > SP. En la PM1 se tuvo los valores mayores de CIC para ambos tipos de muestras. En la PM2 se tuvo la concentración mayor de acidez intercambiable para ambos tipos de muestras (Cuadro 21).

Se puede afirmar que la diferencia mayor en cuanto a CIC y acidez intercambiable se dio en la concentración de acidez intercambiable para la MC que en el SA fue de 4.7 cmol_c kg⁻¹ y en los SF y SP fue de 2.6 cmol_c kg⁻¹ y 1.7 cmol_c kg⁻¹ respectivamente. Para el caso de la acidez intercambiable, se tienen suelos heterogéneos con una desviación en el SA, lo que se explica por los resultados de pH obtenidos, ya que en este sistema se encontraron los valores más bajos. Podemos afirmar que de manera general se tienen suelos homogéneos en cuanto a CIC. Suelos con un pH bajo tienden a tener valores de CIC bajos (Brady & Weil, 1999). Utilizando los valores medios de CIC de los SF,

SA y SP, así como de las PM para ambos tipos de muestra los suelos presentan arcillas caolinitas, así como una CIC baja, de acuerdo con la NOM-021-RECNAT (2002).

La prueba de Tukey mostró que la acidez intercambiable fue significativamente mayor en el SA en comparación con el SP, pero igual que en el SF, esto para ambos tipos de muestra.

Los valores medios de la CIC corresponden a valores de CIC reportados para suelos ácidos y ambientes con altas precipitaciones por Hernández-Hernández, Ramírez, Castro y Cano (2008), Leitgeb, Ghosh, Dobbs, Englisch y Michel (2019) y Palma-López et al. (2015). Para la acidez intercambiable Boley, Drew y Andrus (2009) encontraron resultados similares para esta variable en condiciones climáticas parecidas, dónde en el sistema forestal y en profundidades inferiores obtuvieron concentraciones superiores a los otros SUS y PM, sin embargo la acidez intercambiable en este estudio fue superior en SUS de AA, seguido de AF y finalmente de AP. En otro estudio, se reportó que esta variable es un buen indicador del desarrollo de acidez intercambiable en suelos con distintos SUS (Alfredsson, Condrón, Clarholm, & Davis, 1998).

Cuadro 21. Valores medios, prueba de Tukey y valores más convenientes para capacidad de intercambio catiónico (CIC) y acidez intercambiable

TM	Variable	MS	MC	MS	MC
		CIC		Acidez	
cmol _c kg ⁻¹					
SUS	SA	8.7 ^a (-)	8.7 ^a (+)	4.5 ^a (-)	4.7 ^a (-)
	SF	8.7 ^a (-)	7.6 ^a (-)	3.1 ^{ab} (i)	2.6 ^{ab} (i)
	SP	11.3 ^a (+)	8.5 ^a (i)	2.0 ^b (+)	1.7 ^b (+)
PM (cm)	0 a 10	9.8 ^a (+)	8.3 ^a (+)	2.9 ^a (+)	2.8 ^a (+)
	10 a 20	9.4 ^a (-)	8.2 ^a (-)	3.5 ^a (-)	3.2 ^a (-)

Como en el Cuadro 13

4.4.3.10. Fósforo aprovechable

En la MC y la MS, el comportamiento de la concentración de P se ordenó SA > SF > SP. En la PM1 se tuvo la concentración mayor de P en ambos tipos de muestras (Cuadro 22). Utilizando los valores medios de P de los SF, SA y SP los suelos se clasifican como bajos, según Horneck et al. (2011).

Podemos afirmar que de manera general se tienen suelos homogéneos en cuanto a P con una ligera desviación en el SA cuya concentración de P fue más alta. Las concentraciones bajas de P se deben principalmente a que el P en la solución del suelo (H_2PO_4^-) reacciona con iones como Fe^{3+} , Al^{3+} y Mn^{3+} de suelos fuertemente ácidos formando compuestos insolubles, e. g. $\text{Al}(\text{OH})_2\text{H}_2\text{PO}_4$, de esta manera el P aprovechable no está disponible para su aprovechamiento por las plantas (Bautista et al., 2010; Brady & Weil, 1999; Osman, 2013).

Los resultados de la prueba de Tukey para el P en los distintos SUS y las PM para la MS mostraron que la concentración de P fue significativamente mayor en el SA respecto del SF y del SP. Estos últimos fueron significativamente diferentes respecto de la concentración de P. En relación con la PM, la concentración de P fue significativamente menor en la PM2. Los resultados de la prueba de Tukey en los distintos SUS para la MC mostró que la concentración de P fue significativamente menor en los SF y SP respecto del SA, pero iguales entre ellos.

Tal y cómo lo señalan Weihrauch y Opp (2018), el P presenta concentraciones bajas en suelos derivados de cenizas volcánicas debido a la alta afinidad del alofano e imogolita por este elemento, que lo atrapan y no lo dejan disponible en la solución del suelo, así como por los compuestos de Fe y Al, en suelos altamente intemperizados. Gong et al. (2006) encontraron mayores concentraciones de P en suelos agrícolas que suelos sometidos a un manejo forestal y de pastizal, además estas concentraciones fueron mayores en el incremento de 0 a 20 cm, lo que atribuyen a las continuas aplicaciones de fertilizantes. A la misma conclusión llegan Fernández et al. (2016) al comparar sistemas de producción de café, dónde el manejo intensivo reportó concentraciones mayores, para el caso de la profundidad, las concentraciones

fueron disminuyendo a medida que aumentaba. Por su parte, Yáñez et al. (2018) reportaron mayores concentraciones en sistemas de pastizal respecto a sistemas agrícolas y de plantaciones.

Cuadro 22. Valores medios, prueba de Tukey y valores más convenientes para fósforo (P) aprovechable

TM Variable		MS	MC
		P mg kg ⁻¹	
SUS	SA	2.62 ^{a (+)}	2.39 ^{a (+)}
	SF	1.58 ^{b (i)}	1.50 ^{b (i)}
	SP	1.12 ^{c (-)}	1.32 ^{b (-)}
PM (cm)	0 a 10	1.98 ^{a (+)}	1.84 ^{a (+)}
	10 a 20	1.57 ^{b (-)}	1.63 ^{a (-)}

Como en el Cuadro 13

4.4.3.11. Micronutrientos

El comportamiento de la concentración de Fe para las MS y MC se ordenó SP > SF > SA. Para el Cu y el Mn, el compartimiento fue ligeramente diferente siendo SP > SA > SF en la MS y SA > SP > SF en la MC. En el caso del Zn, el comportamiento de la concentración para ambos tipos de muestra se ordenó SP ≈ SA > SF. En el B, el compartimiento fue diferente siendo SA > SF ≈ SP en la MS y SA ≈ SF > SP en la MC. En la PM1 se tuvo la mayor concentración de micronutrientos en ambos tipos de muestras (Cuadro 23).

Se puede afirmar que la diferencia mayor en cuanto a micronutrientos se dio en la concentración de Fe para la MS, que en el SA fue de 54.0 mg kg⁻¹ y en los SF y SP fue de 76.7 mg kg⁻¹ y 85.1 mg kg⁻¹ respectivamente. Utilizando los valores medios de micronutrientos de los SF, SA y SP los suelos presentaron concentraciones muy altas, altas y moderadamente altas para Fe, B y Cu. Concentraciones medias y moderadamente bajas para Mn y bajas para Zn, de acuerdo con la NOM-021-RECNAT (2002).

De manera general se tienen suelos heterogéneos en cuanto a micronutrientes. A pH ácido, el Fe y Cu son más solubles y disponibles en la solución del suelo (Benítez, 2016; Brady & Weil, 1999), estos valores encontrados pueden generar toxicidad para ciertas plantas. Palma-López et al. (2015) mencionan que un incremento en la concentración de Fe en el suelo es un indicador de un aumento del intemperismo, infertilidad e incremento de la acidez de este. Por su parte, Benítez (2016) reportó deficiencias de Zn, Mn y B en suelos cercanos al sitio de estudio, lo que concuerda con los resultados obtenidos en este estudio.

En la MC, el SP tuvo una concentración significativamente mayor respecto de la concentración en el SA, pero igual que el SF para Fe. La concentración de Fe en la PM1 fue significativamente mayor que la concentración en la PM2, para ambos tipos de muestra.

En la MC, el SF tuvo una concentración significativamente menor respecto de la concentración en los SA y SP para el Cu. La concentración de Cu en la PM1 fue significativamente mayor que la concentración en la PM2.

En la MC, el SF tuvo una concentración significativamente menor respecto de la concentración en los SA y SP para Zn. La concentración de Zn en la PM1 fue significativamente mayor que la concentración en la PM2, para ambos tipos de muestra.

Kyalo, Muyanga, Mbuvi, y Jayne (2019) reportan valores de concentración mayores de Cu, Zn y Mn en áreas cultivadas en comparación con áreas semiperturbadas y no perturbadas, esto concuerda con los resultados obtenidos en este estudio, donde encontramos una concentración superior en el SA y SP. Estos mismos autores reportan concentraciones mayores de B en áreas no perturbadas que áreas cultivadas y semiperturbadas, lo que difiere de lo encontrado en nuestro estudio ya que se encontró una mayor concentración en el SA. La concentración de micronutrientes fue mayor en la PM de 0 a 10 cm respecto a la PM de 10 a 20 cm, esto debido al papel de la MO, ya que al ser mayor el contenido en los primeros centímetros, tiende a suministrar un mayor

porcentaje de nutrimentos a las plantas (Castellanos, Uvalle-Bueno, & Aguilar-Santelises, 2000).

Cuadro 23. Valores medios, prueba de Tukey y valores más convenientes para hierro (Fe), cobre (Cu), zinc (Zn), manganeso (Mn) y boro (B)

TM		MS	MC	MS	MC	MS	MC	MS	MC	MS	MC
Variable		Fe		Cu		Zn		Mn		B	
mg kg ⁻¹											
SUS	SA	54.0 ^{a(+)}	56.0 ^{a(+)}	1.5 ^{a(i)}	2.1 ^{a(-)}	0.5 ^{a(+)}	0.5 ^{a(+)}	10.4 ^{a(i)}	16.7 ^{a(-)}	1.3 ^a	1.2 ^a
	SF	76.7 ^{a(i)}	64.5 ^{ab(i)}	1.3 ^{a(+)}	1.1 ^{b(+)}	0.4 ^{a(-)}	0.3 ^{b(-)}	6.8 ^{a(+)}	6.6 ^{a(+)}	1.1 ^a	1.2 ^a
	SP	85.1 ^{a(-)}	83.4 ^{b(-)}	1.7 ^{a(-)}	1.8 ^{a(i)}	0.5 ^{a(+)}	0.5 ^{a(+)}	10.5 ^{a(-)}	9.1 ^{a(i)}	1.1 ^a	1.0 ^a
PM (cm)	PM1	88.4 ^{a(-)}	83.6 ^{a(-)}	1.7 ^{a(-)}	2.0 ^{a(-)}	0.7 ^{a(+)}	0.6 ^{a(+)}	10.6 ^{a(-)}	12.1 ^{a(-)}	1.2 ^a	1.2 ^a
	PM2	55.5 ^{b(+)}	52.4 ^{b(+)}	1.3 ^{a(+)}	1.3 ^{b(+)}	0.3 ^{b(-)}	0.3 ^{b(-)}	7.9 ^{a(+)}	9.5 ^{a(+)}	1.1 ^a	1.1 ^a

4.4.3.12. Conductividad eléctrica

En la MS, el comportamiento de los valores de la CE se ordenó SA ≈ SF > SP. En la MC, el compartimiento fue ligeramente diferente siendo SA > SF > SP. La PM1 tuvo valores de CE mayores que la PM2, para ambos tipos de muestra (Cuadro 24). Utilizando los valores medios de CE de los SF, SA y SP, así como de la PM, los suelos tienen efectos despreciables por salinidad, según la NOM-021-RECNAT (2002).

Podemos afirmar que de manera general se tienen suelos homogéneos en cuanto a CE con una ligera desviación en el SP cuyo valor de CE fue el menor. Esta condición se debe principalmente a que las sales presentes en el suelo están siendo movidas a través del perfil del suelo por las constantes precipitaciones que ocurren en el sitio de estudio.

La prueba de Tukey para la CE mostró que el SP mostró un valor estadísticamente menor que el SF (para la MS) y que el SP (para la MC). La PM1 tuvo un valor significativamente mayor que la PM2 en la MS.

Esta diferencia entre PM no indica presencia de salinidad. Mangalassery, Kalaivanan, y Philip (2019) reportan para suelos tropicales una CE muy baja,

debido principalmente a que las sales se mueven fácilmente con la abundante cantidad de agua de lluvia en zonas tropicales, sin embargo, valores bajos no siempre descartan la toxicidad por sales en la solución del suelo (Horneck et al., 2011).

Cuadro 24. Valores medios y prueba de Tukey para la variable conductividad eléctrica (CE)

TM Variable		MS	MC
		CE dS m ⁻¹	
SUS	SA	0.05 ^{ab}	0.06 ^a
	SF	0.05 ^a	0.04 ^{ab}
	SP	0.03 ^b	0.03 ^b
PM (cm)	0 a 10	0.05 ^a	0.05 ^a
	10 a 20	0.04 ^b	0.04 ^a

4.4.3.13. Comparación entre factores de estudio

En el Cuadro 25 se puede observar que los valores medios de pH en los sistemas variaron de 4.7 a 5.3, debido a que es mejor un mayor pH al denotar menor acidez, el mejor sistema fue el SP, seguido del SF y en tercer lugar el SA. Para el pH-KCl los valores medios en los sistemas fueron constantes, cercanos a 4.1, debido a que es mejor un mayor pH por propiciar un mejor medio para el crecimiento de las plantas, ninguno de los sistemas fue mejor para esta variable. Para la MO y el C_{org} los valores medios en los sistemas variaron de 1.80 a 2.60 %, y de 1.04 a 1.50 %, respectivamente, debido a que es mejor un valor alto de MO y C_{org} por propiciar una mayor HA en el sistema, aumentar la CIC y servir como fuente de energía para los organismos del suelo, el mejor sistema fue el SP. Los valores medios de N_{total} en los sistemas variaron de 0.09 a 0.13 %, debido a que es mejor un valor alto de N_{total} ya que propicia una mayor mineralización a formas aprovechables por las plantas, el mejor sistema fue el SP seguido del SA y por último el SF lo que se corresponde con lo afirmado para los valores de MO, ya que esta contiene alrededor del 5 % de N_{total}. Para el N_{inorg}, N_{amonio} y N_{nitrate} los

valores medios en los sistemas variaron de 7.28 a 15.39 mg kg⁻¹, de 5.93 a 11.20 mg kg⁻¹, y de 1.81 a 4.31 mg kg⁻¹, respectivamente, debido a que es mejor valores altos por propiciar una mayor cantidad de N disponible para las plantas, el mejor sistema fue el SF seguido del SP y por último el SA. Para la relación C-N los valores medios en los sistemas variaron de 10 A 13, debido a que es mejor una menor relación C-N por propiciar una mayor cantidad de nitrógeno disponible para las plantas, el mejor sistema fue el SA. Para el K_{int}, Mg_{int} y Ca_{int} los valores medios en los sistemas variaron de 0.25 a 0.29 cmol_c kg⁻¹, de 0.27 a 0.60 cmol_c kg⁻¹, y de 0.24 a 0.45 cmol_c kg⁻¹, respectivamente, debido a que es mejor una mayor concentración de bases intercambiables, el mejor sistema para K_{int} fue el SA y para el Mg_{int} y Ca_{int} fue el SF. Los valores medios de CIC y acidez intercambiable variaron de 8.5 a 11.3 cmol_c kg⁻¹, y de 1.7 a 4.7 cmol_c kg⁻¹, respectivamente, debido a que es mejor un valor alto de CIC ya que aumenta la capacidad de almacenar nutrimentos dentro del perfil del suelo y de humedad, los mejores sistemas fueron SP y SA. En lo que respecta a la acidez intercambiable, es mejor un valor menor debido al efecto tóxico de elementos como el H, Fe y Al, así el mejor sistema fue el SP. Los valores medios de P variaron de 1.12 a 2.62 mg kg⁻¹, debido a que es mejor un mayor valor por ser un elemento esencial para el desarrollo de las plantas, el mejor sistema fue el SA, seguido del SF y en tercer lugar el SP. Para los micronutrientes (Fe, Cu, Zn, Mn y B) los valores medios en los sistemas variaron de 54.0 a 85.1 mg kg⁻¹, de 1.1 a 2.1 mg kg⁻¹, de 0.3 a 0.5 mg kg⁻¹, de 6.6 a 16.7 mg kg⁻¹, y de 1.0 a 1.3 mg kg⁻¹, respectivamente, debido a que es mejor un valor menor de Fe, Cu y Mn por su efecto tóxico en suelos muy ácidos, los mejores sistemas fueron el SA para el Fe y el SF para Cu y Mn. Por el contrario, para Zn es mejor un valor mayor, por la deficiencia que se presenta en este estudio, por lo que los sistemas mejores fueron SA y SP. En lo que respecta al B, los valores medios fueron los óptimos, por lo que los tres SUS fueron mejores en esta variable. Finalmente, la CE presentó valores medios de 0.03 a 0.06 dS m⁻¹, esta variable fue positiva en los tres SUS. Para el MS el mejor sistema fue el SP y para la MC el mejor sistema

fue el SF. En el caso de las PM, la PM1 fue mejor que la PM2 en ambos tipos de muestreo.

Se puede afirmar que de manera general que los tipos de muestreo si afectaron el criterio de mejor sistema desde el punto de vista de los valores más convenientes. Los resultados mostraron que con el MS el SP obtuvo los valores mayores de pH, MO, C_{org}, N_{total}, CIC y Zn, con el MC se coincidió en pH, MO y C_{org} además de N_{total}. El SA con el MS obtuvo los valores mayores de K_{int}, P, Zn y B. El SF con el MS y el MC obtuvo los mayores valores de N_{inorg}, N_{amonio}, N_{nitrate}, Mg_{int} y Ca_{int}. Las variables donde no se encontraron diferencias estadísticamente significativas fueron N_{nitrate}, Mn, B, CIC y pH-KCl para ambos tipos de muestreo. En el caso de las PM los valores mayores de las variables pH, MO, C_{org}, N_{total}, N_{inorg}, N_{amonio}, N_{nitrate}, Mg_{int}, Ca_{int}, K_{int}, CIC, P y Zn fueron para la PM1 tanto para el MS como para el MC. Las variables relación C-N, acidez intercambiable, Cu y Mn manifestaron los valores mayores a la PM2 tanto para el MS como para el MC. Las variables que presentaron diferencias estadísticamente significativas para la PM para ambos tipos de muestra fueron la MO, C_{org}, N_{total}, K_{int}, Ca_{int}, Mg_{int}, Fe y Zn.

Cuadro 25. Valores medios de las variables químicas para los distintos SUS y PM en los diferentes tipos de muestro para su comparación desde el punto de vista agronómico

Variable	SA		SF		SP		PM1		PM2	
	MS	MC	MS	MC	MS	MC	MS	MC	MS	MC
pH	4.9 ¹	4.7 ¹	5.2 ²	5.1 ²	5.3 ³	5.4 ³	5.2 ²	5.1 ²	5.1 ¹	5.0 ¹
pH-KCl	4.1 ¹	4.0 ¹	4.1 ¹	4.1 ¹	4.1 ¹	4.1 ¹	4.1 ¹	4.1 ¹	4.1 ¹	4.1 ¹
MO (%)	2.10 ²	1.80 ¹	2.07 ¹	2.14 ²	2.47 ³	2.60 ³	2.56 ²	2.69 ²	1.87 ¹	1.67 ¹
C _{org} (%)	1.23 ²	1.04 ¹	1.19 ¹	1.24 ²	1.43 ³	1.50 ³	1.47 ²	1.55 ²	1.09 ¹	0.97 ¹
N _{total} (%)	0.12 ²	0.11 ³	0.09 ¹	0.10 ²	0.13 ³	0.11 ³	0.13 ²	0.12 ²	0.10 ¹	0.10 ¹
N _{nitrate} (mg kg ⁻¹)	1.35 ¹	1.81 ¹	4.31 ³	4.19 ³	1.81 ²	3.68 ²	2.60 ²	3.77 ²	2.38 ¹	2.68 ¹
N _{inorg} (mg kg ⁻¹)	7.28 ¹	7.74 ¹	15.28 ³	15.39 ³	9.94 ²	13.76 ²	11.38 ²	15.03 ²	10.28 ¹	9.57 ¹
N _{amonio} (mg kg ⁻¹)	5.93 ¹	5.93 ¹	10.96 ³	11.2 ³	8.13 ²	10.09 ²	8.78 ²	11.26 ²	7.90 ¹	6.88 ¹

C-N	10 ³	10 ³	13 ¹	12 ²	12 ²	13 ¹	13 ¹	13 ¹	11 ²	10 ²
K _{int} (cmol _c kg ⁻¹)	0.29 ³	0.29 ³	0.26 ¹	0.28 ²	0.28 ²	0.25 ¹	0.32 ²	0.32 ²	0.23 ¹	0.22 ¹
Mg _{int} (cmol _c kg ⁻¹)	0.27 ¹	0.31 ¹	0.60 ³	0.53 ³	0.53 ²	0.51 ²	0.62 ²	0.59 ²	0.31 ¹	0.31 ¹
Ca _{int} (cmol _c kg ⁻¹)	0.26 ¹	0.24 ¹	0.45 ³	0.41 ³	0.36 ²	0.40 ²	0.46 ²	0.43 ²	0.26 ¹	0.28 ¹
CIC (cmol _c kg ⁻¹)	8.7 ²	8.7 ³	8.7 ²	7.6 ¹	11.3 ³	8.5 ²	9.8 ²	8.3 ²	9.4 ¹	8.2 ¹
Acidez (cmol _c kg ⁻¹)	4.5 ¹	4.7 ¹	3.1 ²	2.6 ²	2.0 ³	1.7 ³	2.9 ²	2.8 ²	3.5 ¹	3.2 ¹
P (mg kg ⁻¹)	2.62 ³	2.39 ³	1.58 ²	1.50 ²	1.12 ¹	1.32 ¹	1.98 ²	1.84 ²	1.57 ¹	1.63 ¹
Fe (mg kg ⁻¹)	54.0 ³	56.0 ³	76.7 ²	64.5 ²	85.1 ¹	83.4 ¹	88.4 ¹	83.6 ¹	55.5 ²	52.4 ²
Cu (mg kg ⁻¹)	1.5 ²	2.1 ¹	1.3 ³	1.1 ³	1.7 ¹	1.8 ²	1.7 ¹	2.0 ¹	1.3 ²	1.3 ²
Zn (mg kg ⁻¹)	0.5 ³	0.5 ³	0.4 ²	0.3 ²	0.5 ³	0.5 ³	0.7 ²	0.6 ²	0.3 ¹	0.3 ¹
Mn (mg kg ⁻¹)	10.4 ²	16.7 ³	6.8 ³	6.6 ³	10.5 ¹	9.1 ²	10.6 ¹	12.1 ¹	7.9 ²	9.5 ²
B (mg kg ⁻¹)	1.3 ³	1.2 ³	1.1 ³	1.2 ³	1.1 ³	1.0 ³	1.2 ²	1.2 ²	1.1 ²	1.1 ²
CE (dS m ⁻¹)	0.05 ³	0.06 ³	0.05 ³	0.04 ³	0.03 ³	0.03 ³	0.05 ²	0.05 ²	0.04 ²	0.04 ²

MS: muestra simple; MC: muestra compuesta; PM1: profundidad de muestreo de 0 a 10 cm; PM2: profundidad de muestreo de 10 a 20 cm; SA: sistema agrícola; SF: sistema forestal; SP: sistema pastizal; exponentes (1,2,3) denotan conveniencia agronómica sobre los SUS y PM, (a mayor número, mayor conveniencia); el significado de cada variable se puede consultar del Cuadro 13 al Cuadro 24

4.5. CONCLUSIONES

Los sistemas de uso del suelo forestal, agrícola y pastizal tuvieron efectos significativos sobre las variables pH, MO, C_{org}, N_{total}, N_{amonio}, N_{inorg}, P, Ca, Mg, Fe, Cu, Zn, CE y acidez intercambiable con el MC, y pH, N_{total}, N_{amonio}, N_{inorg}, P, Mg, CE y acidez intercambiable para el MS.

Las variables que presentaron diferencias estadísticamente significativas para la PM fueron la MO, C_{org}, N_{total}, P, K_{int}, Ca_{int}, Mg_{int}, Fe, Zn y CE con el MS, y MO, C_{org}, N_{total}, relación C-N, N_{amonio}, N_{inorg}, K_{int}, Ca_{int}, Mg_{int}, Fe, Cu y Zn.

Para la interacción, sólo en la MC las variables MO, C_{org}, N_{amonio}, N_{inorg} y Ca_{int} presentaron diferencias significativas, y sólo para la variable N_{total} tanto la MS como la MC presentaron diferencias significativas.

Los métodos de muestreo simple y compuesto incidieron sobre el cumplimiento de los supuestos de normalidad de datos y homocedasticidad de varianzas de las variables químicas. Las variables pH, P, CIC, Zn y CE en el MS mostraron un

no cumplimiento de la normalidad y estas mismas variables con el MC sí lo cumplieron. Las variables Ca_{int} y Cu en el MC mostraron un no cumplimiento de la normalidad y estas mismas variables con el MS sí lo cumplieron. La variable Fe mostró un no cumplimiento de la normalidad en ambos tipos de muestras. Las variables $N_{nitrato}$, N_{inorg} y acidez intercambiable en el MS mostraron un no cumplimiento de la homocedasticidad de varianzas y con el MC si lo cumplieron, por otra parte, las variables relación C-N, Zn, Mn y CE en el MC mostraron un no cumplimiento de la homocedasticidad de varianzas y con el MS si la cumplieron.

Los métodos de muestreo simple y compuesto incidieron en la determinación de la significancia de los efectos de los sistemas de uso de suelo y las profundidades pues afectaron a los valores medios de las variables estudiadas, así como los efectos de interacción.

Los sistemas de uso de suelo pastizal y forestal presentaron los valores más convenientes de las variables químicas desde el punto de vista agronómico, para los tipos de muestreo MS y MC, respectivamente.

La PM de 0-10 cm en general mostró los mayores valores de las variables químicas tanto para el muestro simple como para el compuesto en comparación con la PM de 10 a 20 cm.

4.6. REFERENCIAS

Abbot, L. K., & Murphy, D. V. (2007). *Soil Biological Fertility: A key to sustainable land use in agriculture* (L. K. Abbott & D. V. Murphy, eds.). Dordrecht: Springer.

Abera, Y., & Belachew, T. (2011). Effects of land use on soil organic carbon and nitrogen in soils of Bale, southeastern Ethiopia. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14, 229–235.

Alejo-Santiago, G., Salazar-Jara, F. I., García-Paredes, J. D., Arrieta-Ramos, B. G., Jiménez-Meza, V. M., & Sánchez-Monteón, A. L. (2012). Degradación físico-química de suelos agrícolas en San Pedro Lagunillas, Nayarit. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 15(2), 323–328. Retrieved from <http://www.revista.ccba.uady.mx/ojs/index.php/TSA/article/view/1391>

Alfredsson, H., Condron, L. M., Clarholm, M., & Davis, M. R. (1998). Changes in soil acidity and organic matter following the establishment of conifers on former

grassland in New Zealand. *Forest Ecology and Management*, 112(3), 245–252. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(98\)00346-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(98)00346-6)

Amacher, M. C., Neill, K. P. O., & Perry, C. H. (2007). Soil Vital Signs : A New Soil Quality Index (SQI) for Assessing Forest Soil Health. *Res. Pap. RMRS-RP-65WWW*, (May), 1–12.

Araujo, Q. R., Comerford, N. B., Ogram, A. V., Al-Agely, A., Filho, L. P. S., & Santos, J. G. (2005). Soil carbon and physical property changes in Brazilian Coastal Tableland soils with land use following deforestation. *Agroforestry Systems*, 63(2), 193–198. <https://doi.org/10.1007/s10457-004-3198-7>

Bautista, F., J. Zinck, A., & Cram, S. (2010). Los suelos de Latinoamérica: retos y oportunidades de uso y estudio. *Boletín Del Sistema Nacional de Información Estadística Y Geografía*, 2(3), 93–142. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/237102069>

Benítez, P. I. C. (2016). *Sustentabilidad de los sistemas de producción de limón persa en Jaltepec de Candayoc, Oaxaca*. Universidad Autónoma Chapingo.

Biro, K., Pradhan, B., Buchroithner, M., & Makeschin, F. (2013). Land Use/Land Cover Change Analysis And Its Impact On Soil Properties In The Northern Part Of Gadarif Region, Sudan. *Land Degradation and Development*, 24(1), 90–102. <https://doi.org/10.1002/ldr.1116>

Boley, J. D., Drew, A. P., & Andrus, R. E. (2009). Effects of active pasture, teak (*Tectona grandis*) and mixed native plantations on soil chemistry in Costa Rica. *Forest Ecology and Management*, 257(11), 2254–2261. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.02.035>

Brady, N. C., & Weil, R. R. (1999). *The Nature and Properties of Soils* (12th ed.; P. Education, Ed.). New Jersey, USA.

Braimoh, A. K., & Vlek, P. L. G. (2004). The impact of land-cover change on soil properties in northern Ghana. *Land Degradation & Development*, 15(1), 65–74. <https://doi.org/10.1002/ldr.590>

Cantú Silva, I., Díaz García, K. E., Yáñez Díaz, M. I., González Rodríguez, H., & Martínez Soto, R. A. (2018). Caracterización fisicoquímica de un Calcisol bajo diferentes sistemas de uso de suelo en el noreste de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(49), 59–86.

Carretero, R., Marasas, P. A., Souza, E., & Rocha, A. (2016). Conceptos de utilidad para lograr un correcto muestreo de suelos. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*, 21, 1–11. Retrieved from [http://www.ipni.net/publication/ia-lahp.nsf/0/FD759730AFBB24B685257F86006B8078/\\$FILE/AA-15.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lahp.nsf/0/FD759730AFBB24B685257F86006B8078/$FILE/AA-15.pdf)

Castellanos, J. Z., Uvalle-Bueno, J. X., & Aguilar-Santelises, A. (2000). *Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas* (1st ed.). México, D. F.: INCAPA.

Chen, D. D., Zhang, S. H., Dong, S. K., Wang, X. T., & Du, G. Z. (2010). Effect of land-use on soil nutrients and microbial biomass of an alpine region on the northeastern Tibetan plateau, China. *Land Degradation & Development*, 21, 446–

452. <https://doi.org/10.1002/ldr.990>

Fageria, N. K., & Nascente, A. S. (2014). Management of soil acidity of South American soils for sustainable crop production. In *Advances in Agronomy* (Vol. 128). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802139-2.00006-8>

Fernández, P. R., Acevedo, D. C., Villanueva, A., & Uribe, M. (2016). Estado de los elementos químicos esenciales en suelos de los sistemas natural, agroforestal y monocultivo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7(35), 65–77. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/remcf/v7n35/2007-1132-remcf-7-35-00065.pdf>

Gmach, M. R., Dias, B. O., Silva, C. A., Nóbrega, J. C. A., Lustosa-Filho, J. F., & Siqueira-Neto, M. (2018). Soil organic matter dynamics and land-use change on Oxisols in the Cerrado, Brazil. *Geoderma Regional*, 14. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2018.e00178>

Gong, J., Chen, L., Fu, B., Huang, Y., Huang, Z., & Peng, H. (2006). Effect of land use on soil nutrients in the loess hilly area of the Loess Plateau, China. *Land Degradation & Development*, 17(5), 453–465. <https://doi.org/10.1002/ldr.701>

Hajabbasi, M. a, Jalalian, a, & Karimzadeh, H. R. (1997). Deforestation effects on soil physical and chemical properties, Lordegan, Iran. *Plant and Soil*, 190(1975), 301–308. [https://doi.org/Doi 10.1023/A:1004243702208](https://doi.org/Doi%2010.1023/A:1004243702208)

Hernández-González, D. E., Muñoz-Iniestra, D. J., López-Galindo, F., & Hernández-Moreno, M. M. (2018). Impacto del uso de la tierra en la calidad del suelo en una zona semiárida del Valle del Mezquital, Hidalgo, México. *BIOCyT*, 11(43), 792–807.

Hernández-Hernández, R. M., Ramírez, E., Castro, I., & Cano, S. (2008). *Cambios en indicadores de calidad de suelos de ladera reforestados con pinos (Pinus caribaea) y eucaliptos (Eucalyptus robusta)*. 253–266.

Hernández, J. O., Gutiérrez, M. del C., Ortiz-Solorio, C. A., Sánchez, P., & Ángeles, E. (2017). Calidad de Andosols en sistemas forestal, agroforestal y agrícola con diferentes manejos en Zacatlán, Puebla. *Terra Latinoamericana*, 35, 179–189. <https://doi.org/https://doi.org/10.28940/terra.v35i2.201>

Horneck, D. A., Sullivan, D. M., Owen, J. S., & Hart, J. M. (2011). *Soil Test Interpretation Guide*. Retrieved from <https://catalog.extension.oregonstate.edu/sites/catalog/files/project/pdf/ec1478.pdf>

INEGI. (2001a). Conjunto de datos vectoriales Fisiográficos. Continuo Nacional escala 1:1 000 000 serie I. Provincias fisiográficas. Retrieved February 18, 2019, from <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267575>

INEGI. (2001b). Conjunto de datos vectoriales Fisiográficos. Continuo Nacional escala 1:1 000 000 serie I. Sistema topofomas. Retrieved February 18, 2019, from <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267575>

INEGI. (2001c). Conjunto de datos vectoriales Fisiográficos. Continuo Nacional

escala 1:1 000 000 serie I. Subprovincias fisiográficas. Retrieved February 18, 2019, from <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267575>

INEGI. (2019). Mapa Digital de México V6 3.0. Retrieved February 18, 2019, from gaia.inegi.org.mx/

Kassa, H., Dondeyne, S., Poesen, J., Frankl, A., & Nyssen, J. (2017). Impact of deforestation on soil fertility, soil carbon and nitrogen stocks: the case of the Gacheb catchment in the White Nile Basin, Ethiopia. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 247, 273–282. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.06.034>

Khresat, S., Al-Bakri, J., & Al-Tahnan, R. (2008). Impacts of land use/cover change on soil properties in the Mediterranean region of northwestern Jordan. *Land Degradation and Development*, 19(4), 397–407. <https://doi.org/10.1002/ldr.847>

Krasilnikov, P., Gutiérrez-Castorena, M. del C., Ahrens, R. J., Cruz-Gaistardo, C. O., Sedov, S., & Solleiro-Rebolledo, E. (2013). The Soils of Mexico. In *The Soils of Mexico*. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-5660-1>

Kyalo, D., Muyanga, M., Mbuvi, J., & Jayne, T. (2019). The effect of land use change on soil fertility parameters in densely populated areas of Kenya. *Geoderma*, 343(March), 254–262. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.02.033>

Leitgeb, E., Ghosh, S., Dobbs, M., Englisch, M., & Michel, K. (2019). Distribution of nutrients and trace elements in forest soils of Singapore. *Chemosphere*, 222, 62–70. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.01.106>

Mangalassery, S., Kalaivanan, D., & Philip, P. S. (2019). Effect of inorganic fertilisers and organic amendments on soil aggregation and biochemical characteristics in a weathered tropical soil. *Soil & Tillage Research*, 187(December 2018), 144–151. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.12.008>

Mangiafico, S. S. (2016). Aligned Ranks Transformation ANDEVA. Retrieved from Summary and analysis of extension program evaluation in R website: <https://rcompanion.org/documents/RHandbookProgramEvaluation.pdf>

Mullen, R. W. (2011). Nutrient Cycling in Soils: Nitrogen. In J. L. Hatfield & T. J. Sauer (Eds.), *Soil Management: Building a Stable Base for Agriculture* (pp. 67–78). <https://doi.org/10.2136/2011.soilmanagement.c5>

NOM-021-RECNAT. (2002). *Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis*. México, D. F.: Secretaría de medio Ambiente y Recursos Naturales.

Osman, K. T. (2013). *Soils*. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-5663-2>

Palma-López, D. J., Salgado-García, S., Martínez, G., Zavala-Cruz, J., & Lagunes-Espinoza, L. del C. (2015). Cambios en las propiedades del suelo en plantaciones de eucalipto de Tabasco, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 2(5), 163–172. Retrieved from www.ujat.mx/era

Paustian, K., Lehmann, J., Ogle, S., Reay, D., Robertson, G. P., & Smith, P. (2016). Climate-smart soils. *Nature*, 532(7597), 49–57. <https://doi.org/10.1038/nature17174>

Qi, Y., Chen, T., Pu, J., Yang, F., Shukla, M. K., & Chang, Q. (2018). Response of soil physical, chemical and microbial biomass properties to land use changes in fixed desertified land. *Catena*, 160, 339–344. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.10.007>

Rytter, R.-M. (2016). Afforestation of former agricultural land with Salicaceae species – Initial effects on soil organic carbon, mineral nutrients, C:N and pH. *Forest Ecology and Management*, 363, 21–30. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.12.026>

SMN-CNA. (2019). Información estadística climatológica. Retrieved February 18, 2019, from <https://smn.cna.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>

Soleimani, A., Mohsen, S., Reza, A., Bavani, M., Jafari, M., & Francaviglia, R. (2019). Influence of land use and land cover change on soil organic carbon and microbial activity in the forests of northern Iran. *Catena*, 177, 227–237. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.02.018>

van Reeuwijk, L. P. (2003). *Procedimientos para análisis de suelos (clasificación y correlación)*. Traducción de: Ma. del Carmen Gutiérrez Castorena, Carlos Arturo Tavares Espinosa y Carlos Alberto Ortiz Solorio (1st ed.; L. P. van Reeuwijk, Ed.). Montecillo, Estado de México: Especialidad de Edafología. Colegio de Postgraduados.

Weihrauch, C., & Opp, C. (2018). Ecologically relevant phosphorus pools in soils and their dynamics: The story so far. *Geoderma*, 325(August 2017), 183–194. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.02.047>

Yáñez, M. I., Cantú, I., & González, H. (2018). Effect of land use change on chemical properties of a vertisol. *Terra Latinoamericana*, 36, 369–379. <https://doi.org/10.28940/terra.v36i4.349>