



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DIVISIÓN DE CIENCIAS FORESTALES

MAESTRIA EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

**MUESTREO Y DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES
FÍSICAS Y QUÍMICAS DE SUELOS CON BOSQUE
NATURAL Y PLANTACIONES COMERCIALES**

TESIS

Que como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS FORESTALES

Presenta:

FREDY PÉREZ CORTÉS

Bajo la dirección del:

DR. DAVID CRISTÓBAL ACEVEDO



APROBADA



Chapingo, Estado de México. Julio de 2020

**MUESTREO Y DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS
DE SUELOS CON BOSQUE NATURAL Y PLANTACIONES COMERCIALES**

Tesis realizada por **FREDY PÉREZ CORTÉS** 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:



M.C. Antonio Villanueva Morales

ASESOR:



Dra. Elizabeth Hernández Acosta

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN GENERAL	16
2. MARCO TEORICO Y DE REFERENCIA	18
2.1. MUESTREO DE SUELOS	18
2.1.1. Importancia del muestreo para el análisis de suelos	19
2.1.2. Precaución para una buena toma de la muestra	20
2.1.3. Representatividad.....	20
2.1.4. Precisión y exactitud.....	21
2.2. PROPIEDADES FISICAS DEL SUELO	22
2.2.1. Densidad aparente (DA)	22
2.2.2. Densidad real (DR).....	22
2.2.3. Porosidad (f)	23
2.2.4. Capacidad de campo (CC)	26
2.2.5. Punto de Marchitez Permanente (PMP)	28
2.2.6. Humedad aprovechable (HA)	28
2.2.7. Estabilidad de agregados (SA)	29
2.2.8. Textura del suelo	33
2.3. PROPIEDADES QUÍMICAS	35
2.3.1. Capacidad de intercambio catiónico (CIC)	35
2.3.2. pH.....	35
2.3.3. Materia orgánica (MO).....	37
2.3.4. Carbono (C).....	37
2.3.5. Calcio (Ca).....	38
2.3.6. Fosforo (P).....	41
2.3.7. Potasio (K).....	42
2.3.8. Magnesio (Mg).....	42
2.3.9. Hierro (Fe)	43
2.3.10. Cobre (Cu).....	44
2.3.11. Zinc (Zn)	45
2.3.12. Manganeseo (Mn)	45
2.3.13. Boro (B)	46
2.3.14. Nitrógeno total (Nt)	46
2.3.15. Nitrógeno mineral (Nmin).....	47
2.3.16. Nitratos (NO ₃ ⁻)	48
2.3.17. Amonio (NH ₄ ⁺)	49
2.4. SUELOS FORESTALES	49

2.4.1.	Suelos forestales en comparación con suelos cultivados.....	50
2.5.	CAMBIO DE USO DE SUELO.....	51
2.5.1.	Factores relacionados con el cambio de uso del suelo	54
2.6.	PLANTACIONES FORESTALES COMERCIALES	57
2.7.	REFERENCIAS	60
3.	COMPARACIÓN DE TRES MÉTODOS DE MUESTREO EN SUELOS FORESTALES PARA LA DETERMINACIÓN DE SUS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS.....	69
3.1.	RESUMEN/ABSTRACT	69
3.2.	INTRODUCCIÓN	71
3.3.	MATERIALES Y MÉTODOS	73
3.3.1.	Área de estudio	73
3.3.2.	Metodología de muestreo	74
3.4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	79
3.4.1.	Propiedades Físicas	79
3.4.2.	Propiedades químicas	81
3.4.3.	Coeficiente de variación de propiedades físicas.....	83
3.4.4.	Coeficiente de variación de propiedades químicas	84
3.5.	CONCLUSIONES	86
3.6.	REFERENCIAS	86
4.	PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS EN SUELOS DE BOSQUE TEMPLADO CON COBERTURA NATURAL Y PLANTACIONES FORESTALES.....	89
4.1.	RESUMEN/ABSTRACT	89
4.2.	INTRODUCCIÓN	90
4.3.	MATERIALES Y MÉTODOS	93
4.3.1.	Área de estudio	93
4.3.2.	Método de muestreo.....	95
4.4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	98
4.4.1.	Propiedades Físicas	98

4.4.2. Propiedades Químicas	102
4.4.3. Clasificación de las propiedades físicas y químicas de acuerdo a rangos de valores	110
4.5. CONCLUSIONES	114
4.6. REFERENCIAS	117

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Funciones y tamaños de los poros del suelo.....	24
Cuadro 2. Porosidad y densidad aparente para distintas texturas.	25
Cuadro 3. Constantes de humedad por tipo de suelo.	29
Cuadro 4. Clasificación de los suelos en función de la acidez medida en una relación suelo:agua (1:2).....	36
Cuadro 5. Datos de la pérdida anual de la superficie forestal en México.....	53
Cuadro 6. Descripción de las causas y clasificación de acuerdo con el tiempo en el que éstas actúan sobre el cambio de uso del suelo.....	54
Cuadro 7. Datos de los sistemas.	74
Cuadro 8. Propiedades determinadas en las muestras de suelo colectadas. ..	77
Cuadro 9. Efecto de los métodos de muestreo sobre los valores medios de propiedades físicas.....	80
Cuadro 10. Efecto de los métodos de muestreo sobre los valores medios de propiedades químicas.....	83
Cuadro 11. Coeficiente de variación de las propiedades físicas en cada sistema con los métodos de muestreo.....	84
Cuadro 12. Coeficiente de variación de las propiedades químicas en cada sistema con los métodos de muestreo.....	85
Cuadro 13. Datos de los sistemas.	94
Cuadro 14. Propiedades determinadas en las muestras de suelo colectadas. 97	
Cuadro 15. p-valor y valores medios obtenidos en el análisis estadístico para propiedades físicas.....	102
Cuadro 16. p-valor y valores medios obtenidos en el análisis estadístico para propiedades químicas.....	109
Cuadro 17. Clasificación de las propiedades físicas por categorías de acuerdo a los valores medios obtenidos en el análisis estadístico en los tres sistemas.	112
Cuadro 18. Clasificación de las propiedades químicas por categorías de acuerdo a los valores medios obtenidos en el análisis estadístico en los tres sistemas.....	114

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de los sistemas en el municipio de Villa del Carbón, México.....	74
Figura 2. Ubicación de los puntos de muestreo tomando como referencia el conglomerado. Las muestras SE están marcados con una “X”, las SI con un círculo y las submuestras para formar la compuesta con un triángulo.....	76
Figura 3. Ubicación de los sistemas en el municipio de Villa del Carbón, México.....	94
Figura 4. Ubicación de los puntos de muestreo tomando como referencia el conglomerado.....	96

ABREVIATURAS USADAS

- CC: Capacidad de campo
- CIC: Capacidad de intercambio catiónico
- CUS: Cambio de uso de suelo
- DA: Densidad aparente
- DR: Densidad aparente
- EA: Estabilidad de agregados
- f: Porosidad total
- HA: Humedad aprovechable
- LE: Loma de En medio
- mf: Microporosidad
- Mf: Macroporosidad
- MO: Materia orgánica
- N_{min}: Nitrógeno mineral
- N_{org}: Nitrógeno orgánico
- Nt: Nitrógeno total
- OC: Ocotal
- PMP: Punto de marchitez permanente
- SM: Santa María

DEDICATORIAS

A mis padres: Rogelio Pérez Martínez y Dominga Cortés Bautista. Por que ellos son el motor que me impulsa a seguir adelante.

A Mayra Itzel Velázquez Flores, por brindarme su amor y comprensión en todo momento.

AGRADECIMIENTOS

A mi alma mater, la Universidad Autónoma Chapingo, por forjar mi vida profesional le estaré eternamente agradecido.

A la División de Ciencias Forestales por albergarme en sus aulas durante mi etapa de licenciatura y maestría.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo otorgado para culminar mis estudios de posgrado a nivel maestría.

Al Dr. David Cristóbal Acevedo, por sus atinadas correcciones y observaciones en la elaboración de este documento.

Al M.C. Antonio Villanueva Morales, por su valiosa colaboración y orientación en el proceso del análisis estadístico.

A la Dra. Elizabeth Hernández Acosta por su esmero para la revisión de esta investigación.

DATOS BIOGRAFICOS

Datos personales

Nombre	Fredy Pérez Cortés
Fecha de nacimiento	22 de diciembre de 1991
Lugar de nacimiento	El Cuayo La Esperanza, Zontecomatlán, Veracruz
CURP	PECF911222HVZRRR04
Profesión	Ingeniero Forestal
Cedula profesional	11057032

Desarrollo académico

Preparatoria	Centro de Bachillerato Tecnológico Agropecuario No. 136, San Sebastián, Tantoyuca, Veracruz
Licenciatura	Ingeniería Forestal, División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo

RESUMEN GENERAL

La cobertura forestal y manejo del suelo tiene un efecto importante en sus propiedades físicas y químicas. Los objetivos de esta investigación fueron: comparar los métodos de muestreo simple y compuesto en la determinación de propiedades físicas y químicas de suelos forestales y determinar el estado físico y químico de suelos con bosque natural y plantaciones forestales. Los sistemas seleccionados fueron: plantación forestal para aprovechamiento maderable (SM) y plantación de árboles de navidad (OC) ambos desarrollados en Luvisol, más un bosque natural (LE) desarrollado en un Andosol. En cada sistema se elejieron al azar tres áreas de muestreo y en cada área se tomaron tres muestras de suelo simple externas (SE), cinco muestras simples internas (SI) y una muestra compuesta (CO), todas a una profundidad de 30 cm. En laboratorio se determinaron 12 propiedades físicas y 18 propiedades químicas. Con los valores obtenidos en laboratorio se aplicó un análisis de varianza (ANVA) para determinar si existían diferencias estadísticamente significativas entre los métodos de muestreo aplicados, este análisis se realizó por sistema. Utilizando el coeficiente de variación (CV) para cada variable se determinó cuál de los métodos de muestreo fue más preciso. Para el segundo objetivo se usaron los datos obtenidos con las muestras SI. A los valores obtenidos se les aplicó un análisis de varianza y una comparación de medias de Tukey para determinar diferencias estadísticamente significativas entre sistemas. De igual manera se clasificaron y categorizaron los resultados obtenidos con valores de referencia establecidos por normas oficiales. Para los tres métodos de muestreo usados, el ANVA detectó diferencias significativas en los tres sistemas: para LE en PMP, NH_4^+ , NO_3^- y N_{min} ; para SM en la EA, NH_4^+ , NO_3^- , Nt, N_{min} y N_{org} ; y para OC en la CIC, NH_4^+ , NO_3^- , N_{min} , K y B. En el caso de los CV, las propiedades físicas indicaron valores bajos para la mayoría de las variables determinadas en las muestras CO, en el caso de las propiedades químicas se observaron CV más bajos para las muestras simples. Con esto se concluye que el mejor método de muestreo para determinar propiedades físicas fue el CO, y para las propiedades químicas fue el muestreo simple (MS). Para el segundo objetivo, los resultados indicaron que para las variables físicas el ANVA detectó diferencias significativas entre los sistemas ($p \leq 0.05$) en CC y PMP. Para la prueba de Tukey hubo diferencias en CC, PMP, DR, mf, arena, limo y arcilla. La clasificación con base en los valores de referencia evidenció diferencias en estabilidad de agregados (EA), arena, limo y arcilla. La prueba de Tukey y las diferencias por categorías coincidió en los porcentajes de arena, limo y arcilla donde se marcaron diferencias por ambos procedimientos. Por otra parte, el ANVA y la prueba de Tukey detectaron diferencias significativas entre las variables CC, PMP y mf; pero no para la EA que si lo hizo el análisis por categorías. En las variables químicas el ANVA detectó diferencias significativas entre los sistemas ($p \leq 0.05$) en CIC, pH, NH_4^+ , NO_3^- , N_{min} , K, Mg, Fe, Cu y B. Para Tukey hubo diferencias en CIC, pH, NH_4^+ , NO_3^- , N_{min} , K, Ca, Mg, Fe, Cu, Zn, Mn y B. La clasificación con base en los

valores de referencia presentó diferencias en NH_4^+ , NO_3^- , Nt , N_{min} , N_{org} , Ca , Mg , Zn y B . Entre los sistemas SM y OC hubo diferencias en NH_4^+ , NO_3^- , N_{min} , K y Cu favoreciéndose en las tres primeras variables al sistema SM y en las dos últimas al sistema OC. En cuanto a la comparación de los suelos de plantaciones comerciales con las de bosque natural, el sistema OC fue el menos parecido a éste pues se encontraron diferencias significativas en CIC, NH_4^+ , NO_3^- , N_{min} , K , Mg , Fe , Cu , Mn y B . El sistema SM fue el más parecido a este pues solo se encontraron diferencias significativas en CIC, pH, Ca , Mg , Fe , Zn y B . El suelo con bosque natural en comparación con las plantaciones comerciales tuvo mayor diferencia en propiedades químicas. Las diferencias significativas encontradas en algunos casos favorecieron a los suelos bajo plantaciones comerciales y en otros al bosque natural. El mejor sistema para propiedades físicas fue SM, para las propiedades químicas fue LE. La clasificación de los valores de las variables tanto físicas como químicas por rangos de valores no coincidió con la prueba del ANVA para ubicar a los valores medios como diferentes. De acuerdo con los resultados obtenidos, se concluye que en general el estado de los elementos químicos esenciales en los suelos Luvisoles con diferente cobertura es similar, aunque para algunos elementos como NO_3^- , P , Zn y B , el sistema OC presentó deficiencias. Debido a que los dos tipos de suelos (Andosol, con bosque natural) y (Luvisol, con plantaciones introducidas) son adyacentes y al comportamiento de las propiedades físicas y químicas, es posible, que los suelos de los sistemas SM y OC sean suelos que en algún tiempo fueron Andosoles con cobertura natural y al eliminar ésta y darles otros usos pasaron a Luvisoles. Debido a que el suelo del sistema SM esta en una ubicación y altura intermedias entre los suelos de los sistemas LE y OC, sus propiedades químicas tienen un comportamiento transicional.

ABSTRACT

The forest coverage and soil management have an important effect on its physical and chemical properties. The objectives of this investigation were: to compare the simple and compound sampling methods in the determination of physical and chemical properties of the forest soils and to determine the physical and chemical state of soils with natural forest and forest plantations. The selected systems were: forest plantation for timber harvesting (SM) and Christmas tree plantation (OC) both developed in Luvisol, plus a natural forest (LE) developed in an Andosol. In each system, three sampling areas were chosen at random and in each area three external simple soil samples (SE), five internal simple samples (SI) and one composite sample (CO) were taken, all at a depth of 30 cm. In the laboratory, 12 physical properties and 18 chemical properties were determined. With the laboratory obtained values, an analysis of variance (ANVA) was applied to determine if there were statistically significant differences between the sampling methods applied, this analysis was performed by system. Using the coefficient of variation (CV) for each variable, it was determined which of the sampling methods was more accurate. For the second objective, the data obtained with the SI samples were used. An analysis of variance and a Tukey mean comparison were applied to the obtained values to determine statistically significant differences between systems. Likewise, the results obtained were classified and categorized with official regulations established reference values. For the three sampling methods used, the ANVA detected significant differences in the three systems: for LE in PWP, NH_4^+ , NO_3^- and N_{min} ; for SM in EA, NH_4^+ , NO_3^- , Nt, N_{min} and N_{org} ; and for OC in the CEC, NH_4^+ , NO_3^- , N_{min} , K and B. In the CV case, the physical properties indicated low values for most of the variables determined in the CO samples, in the chemical properties case Lower CVs were observed for the single samples. With this it is concluded that the best sampling method to determine physical properties was the CO, and for chemical properties it was the simple sampling (MS). For the second objective, the results indicated that for the physical variables the ANVA detected significant differences between the systems ($p \leq 0.05$) in SC and PWP. For the Tukey test there were differences in SC, PWP, DR, mf, sand, silt and clay. The based classification on the reference values evidenced differences in aggregate stability (EA), sand, silt and clay. The Tukey test and the categories differences coincide in the sand, silt and clay percentages where the differences are marked by both procedures. On the other hand, the ANVA and the Tukey test detected determined differences between the variables SC, PWP and mf; but not for the EA that the analysis by categories did. In the chemical variables, the ANVA detected differences between the systems ($p \leq 0.05$) in CEC, pH, NH_4^+ , NO_3^- , N_{min} , K, Mg, Fe, Cu and B. For Tukey test there were differences in CEC, pH, NH_4^+ , NO_3^- , N_{min} , K, Ca, Mg, Fe, Cu, Zn, Mn and B. The based classification on the reference values classified differences in NH_4^+ , NO_3^- , Nt, N_{min} , N_{org} , Ca, Mg, Zn and B. Between the SM and OC systems there were differences in NH_4^+ , NO_3^- , N_{min} , K and Cu favoring in the three first variables

of the SM system and in the last two OC system variables. Regarding the comparison of commercial plantation soils with those of natural forest, the OC system was the least similar to this since significant differences were found in CEC, NH_4^+ , NO_3^- , N_{min} , K, Mg, Fe, Cu, Mn and B. The SM system was the most similar to this since only significant differences were found in CEC, pH, Ca, Mg, Fe, Zn and B. The soil with natural forest compared to commercial plantations had a greater difference in chemical properties. The significant differences found in some cases favored the soils under commercial plantations and in others the natural forest. The best system for physical properties was SM, for chemical properties it was LE. The classification of the values of both physical and chemical variables by value ranges did not coincide with the ANOVA test to locate the mean values as different. According to the results obtained, it is concluded that in general the state of the essential chemical elements in Luvisole soils with different coverage is similar, although for some elements such as NO_3^- , P, Zn and B, the OC system presented deficiencies. Because of the two soils types (Andosol, with natural forest) and (Luvisol, with introduced plantations) are adjacent and due to the behavior of the physical and chemical properties, it is possible that the soils of the SM and OC systems are soils that at one time they were Andosols with natural cover already.

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

Dos de los recursos naturales importantes para cualquier país son el suelo y la flora representada por bosques y selvas principalmente, estos recursos están relacionadas fuertemente de manera natural e intrínseca. Las actividades que se realicen en uno de ellos pueden afectar de manera positiva o negativa al otro. Por lo anterior es importante estudiar cuales son los efectos del cambio de uso del suelo (CUS) y compararlos con sistemas de bosque natural.

Los cambios pueden ser sobre sus propiedades físicas, químicas y biológicas, que en un sistema natural se encuentran en un equilibrio productivo, debido a los cientos y en ocasiones miles de años de funcionamiento como tal. Cuando este equilibrio se rompe al sustituir la vegetación natural por otro tipo de cobertura, es posible que la alteración sea muy significativa o imperceptible.

Para poder determinar los efectos del cambio mencionado, es necesario realizar un muestreo de suelos y a partir de éste determinar los valores que se tienen de los parámetros físicos, químicos y biológicos representativos de los sistemas y poder dilucidar el efecto de un manejo forestal más comercial en comparación con el sistema natural. Para realizar el muestreo se tienen dos enfoques principales que es la utilización de muestras simples o muestras compuestas.

El decidir si el muestreo se realiza tomando muestras simples o compuestas es importante, ya que, si bien en el caso de utilizar muestras compuestas se tiene un ahorro tanto físico como económico, no se tiene información de cuál es su precisión respecto al muestreo simple. Por lo anterior, con la finalidad de determinar las diferencias entre el muestreo simple y el compuesto es necesario realizar experimentación para comparar la precisión de estos dos métodos de muestreo.

Por todo lo anterior los objetivos de esta investigación fueron realizar un muestreo de suelos y realizar las determinaciones físicas y químicas en los sistemas de bosque natural, plantación comercial maderable y plantación de árboles de navidad, para: a) Determinar si hay efecto significativo de la utilización de los

métodos de muestreo simple y compuesto sobre el valor de las variables físicas y químicas del suelo. b) Comparar la precisión de los métodos de muestreo simple y compuesto en la determinación de los parámetros físicos y químicos. c) Determinar el efecto del cambio de uso de suelo sobre sus propiedades físicas y químicas y d) Obtener el estado de fertilidad química y física del suelo en tres sistemas forestales.

2. MARCO TEORICO Y DE REFERENCIA

2.1. MUESTREO DE SUELOS

Al estudiar los suelos, el término “muestra” se refiere a las pequeñas porciones de suelo tomadas para representar un horizonte u otra parte del perfil. Este significado no debe confundirse con el uso paralelo de “muestra” para designar un sitio o unidad de suelo seleccionada estadísticamente o con otro criterio, al investigar la distribución de suelos en el campo como discute (Webster, 2008).

Las determinaciones de laboratorio, por muy cuidadosamente que se realicen, carecen de significación si las muestras no representan la clase o parte del suelo que se pretende estudiar. Como existe un límite práctico de tamaño para que las muestras puedan ser trasladadas del campo o tratadas en el laboratorio, resulta que, inevitablemente, se toman pequeñas porciones de suelo como representativas de entidades mucho mayores. Esto significa que no solo el perfil escogido debe constituir un ejemplo típico del suelo al que pertenece, sino que las muestras tomadas de los distintos horizontes, deben ser una representación verdadera de esos horizontes. Algunos análisis de suelos son caros, exigen mucho tiempo y serían un derroche si las muestras no se hubieran escogido con atención, y el investigador no las hubiera descrito y documentado de manera conveniente (Hodgson, 1987).

Vemos por lo tanto que mucho depende del talento del edafólogo cuando este selecciona las muestras. La porción del suelo muestreada debe ser lo más homogénea posible si pretendemos seleccionar en ella una pequeña parte representativa (Hodgson, 1987).

Normalmente, las muestras se obtienen de los horizontes del perfil, pero en ocasiones, también se utilizan otras entidades del suelo. El tamaño y forma de la muestra depende de su finalidad. Como es natural, debe ser lo suficientemente grande para incluir y representar las características que pretendemos examinar (Hodgson, 1987).

2.1.1. Importancia del muestreo para el análisis de suelos

El análisis de suelos es una herramienta fundamental para determinar la fertilidad y potencial del suelo de alguna localidad, región, lote, o cualquier otra área geográfica. Cuando se trata de la evaluación de la fertilidad del suelo la expresión “análisis químico de suelos” es inapropiada, ya que lo que se analiza no es toda la extensión del perfil del suelo sino el material colectado en sus capas más superficiales (Lizcano y Olivera, 2017).

Esta herramienta reúne una serie de parámetros que en conjunto van a dar un resultado al que se le dará una interpretación para un plan de fertilización, dependiendo del tipo de suelo, el tipo de cultivo, la edad y el sistema de producción. Para esto es importante realizar de modo correcto el muestreo, ya que de no hacerlo se pueden presentar varios errores, como la mala interpretación de los resultados obtenidos en los análisis de laboratorio. Es por ello que el muestreo correcto del suelo constituye un factor primordial para la evaluación de su fertilidad, y ante la imposibilidad de analizar todo el volumen y/o peso de la capa arable de un suelo, se utilizan muestras que van a representar todo el universo que se quiere evaluar (Mendoza & Espinoza, 2017).

Tipo de muestras

El muestreo de suelo es la actividad de recolección de las muestras de suelo (representativas), que permiten caracterizar el suelo en estudio. La muestra es definida como una parte representativa que presenta las mismas características o propiedades del material que se está estudiando. Y, las muestras enviadas al laboratorio constituyen las muestras elegidas para ser analizadas de acuerdo a los objetivos establecidos (Mendoza & Espinoza, 2017).

Muestra simple: es la muestra obtenida de una sola extracción del suelo. Son usadas en trabajos de investigación, extensión, y en suelos muy homogéneos. Se recomienda tomar una muestra de un kg por hectárea de suelo, para fines de nutrición de plantas.

Muestra compuesta: se refiere a la muestra de suelo obtenida de varias extracciones o muestras simples, reunidas en un recipiente codificado por profundidad, si es el caso, y luego bien mezcladas, de donde se retira un kg de suelo. Es el muestreo más utilizado para planificar fertilización. Se recomienda entre seis y doce submuestras por unidad de muestreo.

2.1.2. Precaución para una buena toma de la muestra

- Evitar la excesiva manipulación de las muestras para disminuir los riesgos de contaminación antes de que sean entregados al laboratorio.
- Tomar la cantidad de muestra necesaria para evitar sobrepeso en el transporte de las muestras del laboratorio (1 kilogramo por muestra).
- Desinfectar las herramientas después de la toma de la muestra de suelo y antes de proceder a la siguiente.
- Retirar toda aquella impureza (material orgánico, residuos de malezas) para proceder con la obtención o colecta de la muestra.
- No tomar las muestras en orillas de caminos, cercos, bebederos, dormitorios, antiguas construcciones, zonas de vertientes hídricas o de drenajes.
- Realizar un debido chequeo de las herramientas antes de dirigirse al sitio a muestrear.

2.1.3. Representatividad

La representatividad de la muestra está relacionada con los objetivos del muestreo de suelos, los cuales pueden ser: i) manejo de nutrientes (fertilidad), ii) conservación y restauración de suelos (línea base y monitoreo), iii) remediación, y iv) caracterización para fines de planificación del uso de la tierra. Las escalas pueden variar desde pequeñas parcelas, fincas y hasta el nivel de paisaje (comunidad, micro cuenca y multi parcelas) (Mendoza & Espinoza, 2017).

La selección del sitio para realizar el muestreo toma en consideración que sea uniforme en profundidad, color textura, pendiente, posición en la pendiente y uso anterior (homogéneo). En pendientes mayores al 8% es recomendable dividir la parcela en parte alta, media y baja. En condiciones de laderas con suelos de 20% de pendiente, es importante auxiliarse de hojas topográficas, fotografías aéreas y ortofotomapas o mapas de Google (Mendoza & Espinoza, 2017).

En suelos de planicie, no es recomendado muestrear áreas superiores a diez hectáreas en cultivos anuales, y veinte hectáreas en cultivos perennes y pasturas (si son uniformes). Recordemos siempre tener un testigo o comparador representativo del área de muestreo; a nivel de paisaje éste puede ser una parcela inalterada de bosque o una milpa tradicional. En los ensayos experimentales, el testigo es siempre la parcela con manejo tradicional (Mendoza & Espinoza, 2017).

Las dimensiones del muestreo son espacial y temporal. El espacial considera el paisaje, la forma del relieve, la posición en el relieve y la profundidad de muestreo; el temporal considera la época del monitoreo y el número de años necesario para el mismo. La planificación debe considerar algunos procedimientos sencillos que se detallan a continuación (Mendoza & Espinoza, 2017).

2.1.4. Precisión y exactitud

Para tener una mejor comprensión del muestreo de suelos, es importante diferenciar entre exactitud y precisión (Swenson et al., 1984). La exactitud indica que tan cercano está el valor del análisis de suelo al del contenido real del campo, y la precisión describe la reproducibilidad de los resultados. Tanto la precisión como la exactitud están determinadas por el número de submuestras tomadas en el campo. Los métodos con muestreos de altos niveles de precisión y exactitud garantizan una muestra compuesta que representa el campo y cuyos resultados son reproducibles consistentemente cuando se remuestrea el sitio. Como ejemplo, un campo que fue submuestreado 10 veces, usando un procedimiento con una exactitud del 10% y una precisión del 80%, debería tener 8 de cada 10

muestras dentro del 10% del valor real del campo. Investigaciones conducidas en este t3pico demuestran que la exactitud aumenta con el n3mero de submuestras tomadas (Roberts y Henry, 2001).

2.2. PROPIEDADES FISICAS DEL SUELO

2.2.1. Densidad aparente (DA)

La densidad aparente es la expresi3n de la relaci3n entre la masa del suelo seco a 105° C por 24 horas y su volumen total, incluyendo los espacios porosos de suelo. Tomado tal como aparece en el perfil del terreno; en este volumen se incluyen no s3lo las part3culas de suelo, sino tambi3n los espacios de aire y materiales org3nicos. En definitiva, este valor depende de la textura, la estructura y el grado de compactaci3n del suelo. En suelos arenosos la DA puede ser tan alta como 1.6 g/cm³. En francos cercana a 1.2 g/cm³ y en suelos arcillosos cercana a 1.0 g/cm³. Los suelos org3nicos o suelos volc3nicos tienen densidades menores a 1.0 g/cm³ (suelos hum3feros de 0.7 a 1.0 g/cm³, suelos de turba de 0.2 a 0.5 g/cm³). Un suelo agr3cola promedio, cultivado, puede tener un valor de densidad aparente de 1.3 - 1.35 g/cm³. La determinaci3n se realiza por medio de la f3rmula: $DA = Ms / Vt$. Donde: Ms = Masa s3lida (gr). Vt = Volumen total (cm³). La determinaci3n de la densidad aparente es especialmente 3til para calcular la capacidad de retenci3n de agua del suelo y para estimar su grado de compactaci3n. Actualmente existen m3todos basados en la radiaci3n gamma, que permiten medir este par3metro en el campo. (Calvache, 1982, Calvache, 2009).

2.2.2. Densidad real (DR)

A veces la densidad se expresa como peso espec3fico. Siendo la relaci3n entre la masa de s3lidos y el volumen ocupado por esos s3lidos. En la mayor3a de los suelos la densidad promedio de part3culas oscila entre 2.6 y 2.78 g/cm³, siendo bastante confiable el valor de 2.65 g/cm³. Para suelos con contenido de materia org3nica mayor al 5% este valor no es adecuado. La determinaci3n se realiza

mediante la fórmula: $DR = Ms / Vs$. Donde: Ms = Masa sólida. Vs = Volumen de sólidos. (Calvache, 2009).

2.2.3. Porosidad (f)

La porosidad es un índice del volumen relativo de poros en el suelo. Este valor se encuentra por lo general en el rango 0.3 – 0.7 (30 – 70 %). Los suelos de texturas gruesas tienden a ser menos porosos que aquellos de textura fina, aunque el tamaño promedio de los poros individuales es mayor en el primero que en el segundo tipo de suelo. En los suelos con alto contenido de arcilla, la porosidad es muy variable, a medida que el suelo se expande o contrae, se agrega o dispersa, se compacta y se parte. La porosidad total no revela nada acerca de la distribución de poros por el tamaño, que es por sí misma una importante propiedad del suelo, en relación al riego. Se determina por medio de la fórmula:

$$f(\%) = \left(1 - \frac{DA[g/cm^3]}{DR[g/cm^3]} \right) \times 100$$

Donde: f = Porosidad total de la muestra del suelo, [%] DA = Densidad aparente del suelo, $[g/cm^3]$; DR = Densidad real de las partículas $[g/cm^3]$.

Los espacios de poros varían en tamaño, y tanto ese tamaño como la continuidad de los poros tienen una influencia importante sobre el tipo de actividades que ocurren dentro de ellos. El Cuadro 1 muestra las funciones de los poros de diferentes tamaños y su denominación junto con el tamaño de las raíces de los cultivos.

Cuadro 1. Funciones y tamaños de los poros del suelo

Tamaño de los poros (mm diámetro)	Descripción de los poros	Funciones de los poros
<0.0002	Residual	Retienen agua que las plantas no pueden usar.
0.0002 – 0.05	Almacenamiento	Retienen agua que las plantas pueden usar (PPM=0.0002 mm; CC=0.05 mm; pero CC puede variar de 0.03 a 0.1 de diámetro equivalente de 10 a 33 kPa).
>0.5	Transmisión	Permite que el agua drene y que entre el aire.
	Enraizamiento	Permite que las raíces de las plantas penetren libremente.
>0.1 a 0.3		(Tamaño de las raíces: raíces seminales de cereales >0.1mm; extremo de raíces de no cereales (dicotiledóneas)>0.3 mm; barbas absorbentes 0.005 a 0.01 mm)
0.5 – 3.5	Canal de lombrices	Permiten que el agua drene y que entre el aire.
2 – 50	Nidos de hormigas y canales	Permiten que el agua drene y que entre el aire.

Fuente: Hamblin, 1985.

Los suelos con vegetación natural o pasturas implantadas por lo general exhiben una alta porosidad a causa de la intensa actividad biológica, presentando cualidades físicas superiores en comparación a los suelos usados con los cultivos.

La densidad aparente relaciona la masa total de suelo seco con su volumen total, por lo que en esta medición de densidad se tiene en cuenta el espacio que ocupan los poros en el suelo. El Cuadro 2 muestra los rangos de porosidad y densidad aparente de distintas texturas de suelo.

Cuadro 2. Porosidad y densidad aparente para distintas texturas.

Textura del suelo	Porosidad (%)	Densidad aparente (g/cm³)
Arenoso	38 (32 – 42)	1.65 (1.55 – 1.80)
Franco arenoso	43 (40 – 47)	1.50 (1.40 – 1.60)
Franco	47 (43 – 49)	1.40 (1.35 – 1.50)
Franco arcilloso	49 (47 – 51)	1.35 (1.30 – 1.40)
Arcillo arenoso	51 (49 – 53)	1.30 (1.35 – 1.30)
Arcilloso	53 (51 – 55)	1.25 (1.20 – 1.30)

Fuente: Ferreyra Espada, R. (2010).

Se consideran por separado los macroporos que representan los poros más grandes, que son los que contribuyen a la aireación del suelo y que se utilizan para la circulación del agua, mientras que los microporos se refieren a los poros más pequeños que se utiliza para el almacenamiento del agua. La porosidad de aireación es separada de los poros del agua en base al tamaño de los poros que retiene el agua con una succión de 1/3 de atmósferas. Existiendo una relación entre la porosidad y la capacidad de campo, donde los microporos están repletos de agua. La Porosidad total se determina con la fórmula: $P[\%] = P_{ma}[\%] + P_{mi}[\%]$ Donde: P = porosidad total de la muestra de suelo %; P_{ma} = macroporosidad %; P_{mi} = microporosidad %. Actualmente se puede determinar la porosidad del suelo en condiciones de campo, utilizando Sondas de Neutrones o DIVINER y los tensiómetros (Calvache, 2009).

Clasificación de poros

La clasificación de la porosidad, de acuerdo con sus características de conducción o almacenamiento, puede resumirse en tres categorías (González-Cervantes et al., 2004):

1. Porosidad sub-microscópica, con poros demasiado pequeños que dificultan el agrupamiento de moléculas de agua y por lo tanto tampoco permiten el flujo continuo.

2. Porosidad microscópica o capilar, con poros dados por la matriz del suelo y la estructura entre agregados; su morfología depende de la génesis y del uso del suelo; el tamaño de los poros es de entre 15 y 30 μm .
3. Macroporosidad, con poros grandes no capilares que pueden tener diferente origen: actividad microbiana, grietas, cambios volumétricos, contracción-expansión del suelo y efectos inducidos (labranza) en el caso de suelos agrícolas (Pires et al., 2008). Los macroporos dependen también de la presencia de una cubierta vegetal y de las condiciones climáticas (Tuller y Or, 2002; Kutílek, 2004).

2.2.4. Capacidad de campo (CC)

Las definiciones y conceptos propuestos o asumidos para CC incluyen:

- "La cantidad de agua retenida en el suelo después de que el exceso de agua gravitacional se haya drenado y después de que la tasa de movimiento descendente del agua haya disminuido materialmente, lo que generalmente ocurre dentro de 2 o 3 días en suelos permeables de textura y estructura uniformes" (Veihmeyer y Hendrickson, 1931).
- "Límite práctico superior del contenido de humedad del suelo encontrado en condiciones de campo en un suelo que tiene un drenaje secundario sin obstrucciones" (Colman, 1947).
- "Cantidad aproximada de agua que puede retenerse permanentemente en el suelo en oposición a la fuerza descendente de la gravedad" (Dictionary Geotechnical Engineering, 2014).
- "Contenido de humedad más bajo al que se puede llevar un suelo solo por drenaje" (Childs, 1957).
- "Contenido de agua del suelo que se ha dejado drenar libremente durante dos días desde la saturación con pérdida insignificante debido a la evaporación" (Townend et al., 2000).

- "Es el contenido de agua restante en un suelo 1, 2 o 3 días después de haber sido humedecido con agua y después del drenaje libre es insignificante (Colman, 1947; Glossary of Soil Science Terms, 2008).
- Contenido de agua en la zona de la raíz en un suelo inicialmente saturado o saturado en el campo después de:
 - la tasa de cambio del contenido de agua se acerca a cero (Kutilek y Nielsen, 1994; Lal y Shukla, 2004) o se vuelve "relativamente pequeña" (Ratliff et al., 1983);
 - el flujo de drenaje ha "disminuido materialmente" (Veihmeyer y Hendrickson, 1931), o "cesó efectivamente" (Encyclopedia of Soil Science, 2008), o "se vuelve insignificante" (Meyer y Gee, 1999).

Todas estas definiciones y conceptos son en esencia válidos, pero claramente no son precisos. Sin embargo, lo que está claro es que los componentes fundamentales de la CC incluyen: i) un contenido de agua en el suelo; ii) drenaje del agua del suelo expresado como un flujo de drenaje o una tasa de cambio en el contenido de agua; iii) tiempo de drenaje desde la saturación; y iv) una profundidad o rango de profundidad en el perfil del suelo.

Técnicas tradicionales para estimar la capacidad de campo.

La capacidad de campo se ha estimado tradicionalmente utilizando una gama de los llamados enfoques "estáticos" y "dinámicos" (Assouline y Or, 2014).

Enfoques estáticos para estimar la capacidad de campo. Este enfoque generalmente implica colocar una muestra de suelo saturada en un tanque de tensión o placa, aplicar la presión (h_{CC}) especificada a la muestra usando una columna de agua colgante, sistema de vacío o presión, y medir el contenido promedio de agua de la muestra (es decir, θ_{CC}) después de un período de tiempo establecido (por ejemplo, 1–20 días, dependiendo de la h_{CC}) o cuando el drenaje por gravedad de la muestra se detiene efectivamente (Townend et al., 2000).

Enfoques dinámicos para estimar la capacidad de campo. Los enfoques dinámicos se desarrollaron porque se sabe que el drenaje por gravedad de la saturación es dependiente de la profundidad y casi asintótico en el tiempo (Romano y Santini, 2002; Brady y Weil, 2008). Por lo tanto, h_{cc} y θ_{cc} nunca se equilibran a valores verdaderamente constantes, como se supone en los enfoques estáticos. Sin embargo, la tasa de drenaje disminuye a valores pequeños (Romano y Santini, 2002; Brady y Weil, 2008; Ratliff et al., 1983); y como resultado, se han propuesto varias tasas de drenaje "limitantes" y tiempos de drenaje en los cuales el movimiento de agua o soluto se considera sin importancia, y las correspondientes h_{cc} y θ por lo tanto, los valores de CC se consideran "efectivamente constantes".

2.2.5. Punto de Marchitez Permanente (PMP)

El punto de marchitamiento permanente (PMP) es el punto mínimo de humedad del suelo que una planta requiere para no marchitarse. Si la humedad disminuye a este, o cualquier punto más bajo, una planta se marchita y ya no puede recuperar su turbiedad cuando se coloca en una atmósfera saturada durante 12 h. Es una propiedad hidráulica importante del suelo y se ha utilizado ampliamente para calcular la lámina de agua requerida para el riego (Asgarzadeh et al., 2011; Groenevelt et al., 2001; Kirkham, 2005; Minasny y McBratney, 2003) y para determinar disponibilidad de agua. La información es importante para evaluar la idoneidad de un área de tierra para producir un cultivo dado (Hosseini et al., 2016). En áreas pequeñas u homogéneas, solo se requieren unas pocas muestras para proporcionar estimaciones precisas del PMP (Givi et al., 2004); sin embargo, es prácticamente imposible determinar la variabilidad espacial del PMP en grandes áreas cuando el tiempo y los fondos son limitados; por lo tanto, se necesitan formas económicas y rápidas para estimar las propiedades del suelo (McBratney et al., 2003).

2.2.6. Humedad aprovechable (HA)

A la cantidad de agua retenida en el suelo entre los valores de capacidad de campo (θ_{cc}) (entre -0.1 y -0.3 bares) y punto de marchitez permanente (θ_{PMP}) (-

15 bares) se le conoce como humedad aprovechable (HA). Se refiere a la máxima cantidad de agua que puede retener el perfil del suelo ocupado por las raíces de las plantas (Pr). Regularmente se estima como una lámina o espesor de agua:

$$HA = (\theta_{CC} - \theta_{PMP}) Pr$$

Donde θ_{CC} y θ_{PMP} se expresan en m^3 de agua por m^3 de suelo, HA y Pr en metros.

El Cuadro 3 muestra valores promedio del contenido de humedad a saturación (θ_s), θ_{CC} , θ_{PMP} y HA para cada tipo de textura y a un metro de profundidad del suelo, los cuales fueron derivados de Saxton et al., (1986). Como puede notarse, los suelos de textura fina tienen mayor HA que los de textura gruesa.

Cuadro 3. Constantes de humedad por tipo de suelo.

Textura	θ_s	θ_{CC}	θ_{PMP}	HA (m)
Arenosa	0.3545	0.1280	0.0567	0.0714
Areno francosa	0.3878	0.1598	0.0764	0.0834
Franco arenosa	0.4697	0.2522	0.1740	0.0782
Franca	0.4617	0.2540	0.1180	0.1360
Franco arcillo arenosa	0.4784	0.2676	0.1724	0.0952
Franco arcillosa	0.5018	0.3215	0.1838	0.1377
Franco arcillo limosa	0.5203	0.3648	0.1941	0.1707
Franco limosa	0.4676	0.2857	0.1062	0.1794
Arcillo arenosa	0.5052	0.3333	0.2419	0.0914
Arcillo limosa	0.5422	0.4403	0.2786	0.1617
Arcillosa	0.5566	0.5359	0.4127	0.1232
Limosa	0.4154	0.3154	0.0962	0.2192

Fuente: Saxton et al., 1986.

2.2.7. Estabilidad de agregados (SA)

La agregación del suelo se define como un grupo de dos o más partículas primarias que presentan una cohesión mucho más fuerte entre ellas que con las partículas que las rodean (Hillel, 1998; Porta et al., 1999). La agregación del suelo es un producto de interacciones entre la comunidad microbiana, componentes

orgánicos e inorgánicos, y de la presencia de plantas sobre la superficie de la tierra (Tisdall y Oades, 1982).

Brady y Weil (1999) menciona cuatro niveles de organización jerárquica de los agregados que fueron elaborados por Oades (1993) y Tisdall (1994). En cada nivel se mencionan los factores principales que intervienen en la agregación del suelo. (a) un macroagregado está compuesto de muchos microagregados unidos por hifas y raíces finas, (b) un microagregado está constituido principalmente de granos finos de arena y grupos más pequeños de limo y arcilla, unidos principalmente por la actividad microbiana, restos orgánicos, raíces e hifas, (c) un submicroagregado está constituido de partículas finas de limo incrustados con restos orgánicos y restos microbianos, incluso también con arcilla, humus y óxidos de Fe o Al, (d) conglomerados de arcilla, unidos por la interacción con óxidos de Fe o Al y en las más pequeñas escalas con polímeros orgánicos.

Existen varias clasificaciones de tamaño de agregados según el objetivo de estudio, como la de Oades (1993) y Tisdall (1994) donde ordenan a los agregados de la siguiente manera: macroagregados de 3 mm, microagregados 0.3 mm, submicroagregado 0.03 mm y conglomerados de arcilla de 0.003 mm. Warrick (2002) cataloga a los macroagregados como mayores de 250 micras y microagregados menores de 250 micras. Cammeraat y Imeson (1998) establecen a los macroagregados como mayores de 106 micras y microagregados menores de 106 micras, mientras que Barthés y Roose (2002) categorizan a los macroagregados como mayores de 0.2 mm, mesoagregados 0.02-0.2 mm y microagregados menores de 0.02 mm.

Bronick y Lal (2005) mencionan que la agregación del suelo se encuentra en una continua interacción con distintos agentes como son: i) procesos de formación del suelo (procesos pedogenéticos), ii) propiedades del suelo (físicas, químicas y biológicas), iii) factores exógenos (condición del terreno y clima), iv) intervención de las perturbaciones antropogénicas. Estas interacciones establecen una dinámica continua en la agregación del suelo.

Factores de formación de los agregados

Las propiedades de suelo que participan en la agregación del suelo son la materia orgánica (concentración de carbono orgánico del suelo), textura (contenido de arcilla), mineralogía arcillosa, cementantes inorgánicos (carbonato de calcio, sesquióxidos de hierro y aluminio), iones intercambiables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+}), actividad microbiana (micorrizas) y raíces. La contribución de un mayor o menor grado de cada uno de estos factores, dependen de las condiciones del medio físico que se encuentren dentro del ecosistema (Le Bissonnais, 1996; Chappell et al., 1999).

Materia orgánica. El efecto de la materia orgánica del suelo (MO) en la formación y estabilización del agregado depende de la dinámica de descomposición o transformación de la MO a las diferentes formas de carbono orgánico, su localización espacial y el grado de asociación con materiales minerales (Kay, 1998). Varios estudios han encontrado una relación muy estrecha entre el nivel de agregación y la materia orgánica del suelo (descritos en la revisión por Tisdall y Oades, 1982), otros muestran que la incorporación de residuos orgánicos influye en la formación de agregados estables en agua (Lynch y Bragg, 1985).

Textura. La textura del suelo tiene una influencia significativa en la agregación. Kay (1998) señala que cuando el contenido de arcilla es alto, la forma y estabilidad de los agregados están en función de sus características debido a la acción cementante, a la propiedad de expansión y contracción que ocurre con los cambios de humedad y al potencial electrocinético que sirve para la atracción de las demás partículas. Sin embargo, Le Bissonnais (1996) menciona que no siempre hay una intervención clara de la textura en los agregados. Las propiedades físicas de los suelos cambian con el incremento del contenido de arcilla, cuando es mayor del 30% el comportamiento de los suelos depende del tipo de arcilla (Oades, 1993).

Minerales arcillosos. Los minerales arcillosos influyen en propiedades que intervienen en la agregación del suelo, como la superficie específica, la capacidad de intercambio catiónico, la densidad de carga, la dispersión y expansibilidad (Dimoyiannis et al., 1998). Las partículas con mayor agregación

son las esmécticas, por su gran superficie específica y alta capacidad de interacción fisicoquímica. La arcilla con baja capacidad de intercambio catiónico como la kaolinita, induce una menor agregación que la montmorillonita porque tiene menos área superficial, sin embargo, los agregados son menos estables con arcilla montmorillonita ya que puede dispersarse más fácilmente que la kaolinita. Lo anterior se debe a que la kaolinita está más asociada con los óxidos de hierro y aluminio (Stern et al., 1991; Chappell et al., 1999).

Cementantes inorgánicos. Los cementantes inorgánicos colaboran en la formación y estabilidad de los agregados. Los sesquióxidos de Fe y Al, forman coloides muy lentamente reversibles y ayudan a formar agregados estables a la acción del agua (Bartoli et al., 1988). El carbonato de calcio que se precipita alrededor de las partículas de suelo también actúa como cementante (Le Bissonnais, 1996).

Iones intercambiables. El efecto de los iones intercambiables en la estabilidad o dispersión depende del tamaño y valencia del catión. Por consiguiente, los cationes pueden ser clasificados en el siguiente orden: $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+$ (Levy et al., 1988; Levy y Van Der Watt, 1990). La participación del calcio, magnesio y potasio en el proceso de la agregación es revertir al coloide coagulado a un estado disperso. El Ca^{2+} y en menor grado el Mg^{2+} , inducen la floculación de la arcilla permitiendo que las partículas puedan agregarse, además de que son importantes en la nutrición del suelo (Brady y Weil, 1999). Por otro lado, el Na^+ tiende a deflocular la arcilla y a crear una reacción en la que muchos de los nutrientes presentes no pueden aprovecharse, por lo tanto, disminuye el crecimiento de raíces y microorganismos, causando condiciones no favorables a la agregación (Armstrong y Tanton, 1992).

Hongos. Los hongos unen a los agregados mediante diferentes mecanismos tales como la adsorción, envolvimiento físico y cementación, debido a la excreción de productos mucilaginosos. El funcionamiento de los hongos en la agregación del suelo depende de los regímenes de humedad, pH del suelo, del potencial oxido-reducción, estatus de nutrientes del sustrato, el tipo y cantidad de

materia orgánica (Brady y Weil, 1999). Principalmente, los hongos arbusculares micorrizicos producen una proteína llamada glomalina, que tiene características excepcionales como adherente y por lo tanto favorece a la estabilización y estructuración del suelo (Tisdall, 1991; Miller y Jastrow, 2000).

Raíces. Las raíces favorecen a la agregación del suelo debido a que presenta ciertas características como son: a) la excreción de compuestos orgánicos y minerales, que sirven como ligamentos para la unión de partículas, b) la presión ejercida por la raíz causa grietas al contraerse el suelo, lo que origina rompimientos y posteriormente formación de otro tipo de agregados, c) las raicillas ayudan a mantener juntas las partículas del suelo (Oades, 1993; Czarnes et al., 2000).

2.2.8. Textura del suelo

Se define la textura del suelo como la proporción (en porcentaje de peso) de las partículas menores a 2 mm de diámetro (arena, arcilla y limo) existentes en los horizontes del suelo (Gisbert-Blanquer et al., 2010).

En edafología las partículas de un suelo se clasifican en elementos gruesos (diámetro > 2 mm) y elementos finos (< 2 mm). Estos últimos son los utilizados para definir la textura de un suelo (Gisbert-Blanquer et al., 2010).

Siguiendo la terminología establecida por la USDA (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América) (Soil Survey Staff, 1999), tenemos las siguientes clases de partículas inferiores a 2 mm de diámetro (\emptyset):

Arena muy gruesa	$2 \text{ mm} > \emptyset > 1 \text{ mm}$
Arena gruesa	$1 \text{ mm} > \emptyset > 0.5 \text{ mm}$
Arena media	$0.5 \text{ mm} > \emptyset > 0.25 \text{ mm}$
Arena fina	$0.25 \text{ mm} > \emptyset > 0.10 \text{ mm}$
Arena muy fina	$0.10 \text{ mm} > \emptyset > 0.05 \text{ mm}$
Limo	$0.05 \text{ mm} > \emptyset > 0.002 \text{ mm}$
Arcilla	$\emptyset < 0.002 \text{ mm}$

A grandes rasgos se clasifica como: Arena $2 \text{ mm} > \varnothing > 0.05 \text{ mm}$, Limo $0.05 \text{ mm} > \varnothing > 0.002 \text{ mm}$ y Arcilla $\varnothing < 0.002 \text{ mm}$.

Clases texturales

Se agrupan en cuatro grandes grupos que poseen características similares (Gisbert-Blanquer et al., 2010):

Texturas arcillosas. Son suelos plásticos y difíciles de trabajar. Retienen gran cantidad de agua y de nutrientes debido a la microporosidad y a su elevada capacidad de intercambio catiónico. Aunque retengan agua en cantidad presentan una permeabilidad baja, salvo que estén bien estructurados y formen un buen sistema de grietas.

Textura arenosa. Es la contrapuesta a la arcillosa, pues cuando en superficie hay una textura arenosa los suelos se conocen como ligeros, dada su escasa plasticidad y facilidad de trabajo. Presenta una excelente aireación debido a que las partículas dominantes de gran tamaño facilitan la penetración del aire. Únicamente cuando se producen lluvias intensas se puede producir encharcamiento o escorrentía, momento en el que la erosión laminar es muy importante. La acumulación de materia orgánica es mínima y el lavado de los elementos minerales es elevado.

Textura limosa. Presenta carencia de propiedades coloidales formadoras de estructura, formando suelos que se apelmazan con facilidad impidiendo la aireación y la circulación del agua. Es fácil la formación de costras superficiales que impiden la emergencia de las plántulas.

Texturas francas o equilibradas. Al tener un mayor equilibrio entre sus componentes gozan de los efectos favorables de las anteriores sin sufrir sus defectos, el estado ideal sería la textura franca y a medida que nos desviamos de ella se van mostrando algunos inconvenientes.

2.3. PROPIEDADES QUÍMICAS

2.3.1. Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

La Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) es una medida de la cantidad de cargas negativas presentes en las superficies de los minerales y componentes orgánicos del suelo (arcilla, materia orgánica o sustancias húmicas) y representa la cantidad de cationes que las superficies pueden retener (Ca, Mg, Na, K, NH_4^+ , entre otros). Estos serán intercambiados por otros cationes o iones de hidrógeno presentes en la solución del suelo y liberados por las raíces (FAO, 2020).

El nivel de la CIC indica la habilidad de suelos a retener cationes, disponibilidad y cantidad de nutrientes a la planta, su pH potencial, entre otras. Un suelo con bajo CIC indica baja habilidad de retener nutrientes, arenoso o pobre en materia orgánica. La unidad de medición de CIC es en centimoles de carga por kg de suelo cmolc/kg o meq/100g de suelo (FAO, 2020).

2.3.2. pH

El pH (potencial de hidrógeno) determina el grado de adsorción de iones (H^+) por las partículas del suelo e indica si un suelo es ácido o alcalino. Es el indicador principal en la disponibilidad de nutrientes para las plantas, influyendo en la solubilidad, movilidad, disponibilidad y de otros constituyentes y contaminantes inorgánicos presentes en el suelo. El valor del pH en el suelo oscila entre 3.5 (muy ácido) a 9.5 (muy alcalino). Los suelos muy ácidos (< 5.5) tienden a presentar cantidades elevadas y tóxicas de aluminio y manganeso. Los suelos muy alcalinos (> 8.5) tienden a dispersarse. La actividad de los organismos del suelo es inhibida en suelos muy ácidos y para los cultivos agrícolas el valor del pH ideal se encuentra en 6.5 (FAO, 2020).

El pH del suelo influye en la disponibilidad de los nutrimentos para las plantas, es decir, este factor puede ser la causa de que se presente deficiencia, toxicidad o que los elementos no se encuentren en niveles adecuados (Benton, 2003). Por otra parte, valores extremos del pH pueden afectar la estructura del suelo (Edward, 2000).

Existen cuatro intervalos de pH que permiten tener una idea clara sobre lo que ocurre en el suelo (INTAGRI, 2018):

- 1) pH menor a 4.0 indica la presencia de ácidos libres como producto de la oxidación de sulfuros
- 2) Valores por debajo de 5.5 sugiere la presencia de aluminio intercambiable y/o exceso de manganeso
- 3) pH entre 7.3 a 8.4 señala la posibilidad de tener carbonato de calcio (CaCO_3)
- 4) pH mayor a 8.2 indica la posible presencia de concentraciones elevadas de sodio intercambiable.

El rango de pH del suelo que de forma general se considera el más adecuado por la disponibilidad que muestran los nutrimentos esenciales para las plantas, es aquél que va de 6.0 a 6.5. Sin embargo, otros autores manejan un rango más amplio que va de 5.5 a 7.0. El caso de suelos Andosoles es muy particular, ya que, a pesar de tener el pH dentro del rango, considerado adecuado, se presentan problemas con altos niveles de aluminio y baja disponibilidad de fósforo (INTAGRI, 2018).

El incremento o decremento del valor de pH en el suelo depende de distintos factores como son: 1) Alcalinidad del agua 2) Enmiendas orgánicas (composta, abonos) o minerales (yeso, cal agrícola o azufre) 3) Acidificación por las raíces 4) Uso de fertilizantes de reacción ácida o alcalina y 5) Precipitación (INTAGRI, 2018).

Cuadro 4. Clasificación de los suelos en función de la acidez medida en una relación suelo:agua (1:2).

Grado de acidez o alcalinidad	pH
Extremadamente ácido	< 4.6
Ácido	4.6 – 5.4
Moderadamente ácido	5.5 – 6.4
Neutro	6.5 – 7.3
Moderadamente alcalino	7.4 – 8.1
Alcalino	8.2 – 8.8

Grado de acidez o alcalinidad	pH
Extremadamente alcalino	> 8.9

Fuente: Castellanos, 2000.

2.3.3. Materia orgánica (MO)

La materia orgánica del suelo (MO) se ha definido como una mezcla heterogénea de: residuos de plantas y animales en varios estados de descomposición, sustancias sintetizadas microbiológicamente y/o químicamente a partir de los productos de degradación de los cuerpos de microorganismos vivos y muertos, pequeños animales y sus restos en descomposición (Schnitzer, 1991).

La MO ejerce una serie de efectos benéficos sobre la fertilidad del suelo y el crecimiento de las plantas, no sólo a través de la suplencia de nutrimentos, sino además por sus efectos favorables sobre las propiedades físicas (tiende a mejorar la estructura del suelo, aumenta la capacidad de retención de agua), químicas (aumenta la capacidad de intercambio catiónico, mejora la capacidad amortiguadora de pH) y biológicas del suelo (por ser fuente de nutrimentos y energía para los microorganismos). La variación del contenido de MO en los suelos ha sido evaluada en diversas investigaciones, y su mayor o menor proporción ha sido atribuida a diferentes factores: clima, vegetación, material parental, relieve, tiempo, (Stevenson, 1982).

2.3.4. Carbono (C)

El carbono orgánico del suelo (COS) es el carbono que permanece en el suelo después de la descomposición parcial de cualquier material producido por organismos vivos. Constituye un elemento clave del ciclo global del carbono a través de la atmósfera, vegetación, suelo, ríos y océano (FAO, 2017).

El COS es el componente principal de la materia orgánica del suelo (MOS) y, como tal, constituye el combustible de cualquier suelo. La pérdida de COS indica un cierto grado de degradación del suelo (FAO, 2017).

Los suelos representan el mayor reservorio de carbono orgánico terrestre. Dependiendo de la geología local, las condiciones climáticas y el uso y gestión

del territorio (entre otros factores ambientales), los suelos tienen diferentes cantidades de COS (FAO, 2017).

Se ha estimado que las mayores cantidades de COS se almacenan en la región de permafrost del norte con alrededor de 190 Pg C en los primeros 30 cm del suelo (0-30 cm), principalmente en suelos de turba. Allí, el carbono se acumula en los suelos en grandes cantidades debido a las bajas temperaturas que conducen a una baja actividad biológica y una descomposición lenta de la MOS. El tipo de suelo correspondiente se llama Histosol y se caracteriza por un contenido de COS del 12 al 18% (FAO, 2017).

Por el contrario, en regiones secas y cálidas como el desierto del Sahara, el crecimiento de las plantas es naturalmente escaso y sólo una pequeña cantidad de carbono entra en el suelo. Los arenosoles, suelos típicos de estas áreas, tienen en su mayoría menos del 0.6% de COS (FAO, 2017).

Los suelos negros, como los chernozems, son intrínsecamente fértiles debido a su contenido relativamente alto de COS (más del 1 o 2%) y las condiciones óptimas para el crecimiento de las plantas en términos de capacidad de intercambio de nutrientes y una estructura bien desarrollada que permite suficiente provisión de agua (FAO, 2017).

2.3.5. Calcio (Ca)

El calcio (Ca) es el catión más abundante en los suelos, raramente ha constituido un factor limitante para la producción agrícola; salvo en suelos ácidos con lluvias abundantes, donde resulta necesario el aporte de materiales cálcicos, principalmente carbonatos que eleven el pH (Cajuste, 1977). El contenido de calcio en la corteza terrestre es de 3.6% (Mengel y Kirkby, 2001). Los suelos no calcáreos, de regiones húmedas poseen por lo general entre 0.15 y 1.5 % de Ca total y en promedio alrededor de 1%. Pero en suelos muy meteorizados del trópico húmedo los contenidos varían entre 0.1 y 0.03 % de Ca, independientemente de la textura (Kass, 1998). El Ca^{2+} presente en el suelo, aparte del añadido como fertilizantes diversos, procede de las rocas y de los

minerales de los que el suelo está formado, y su contenido total puede variar ampliamente.

Los compuestos que pueden señalarse como más importantes son los carbonatos: calcita (CO_3Ca) y dolomita ($\text{CO}_3\text{Ca}\cdot\text{CO}_3\text{Mg}$), en segundo lugar los fosfatos: flúorapatita ($3(\text{PO}_4)_2\text{Ca}_3\cdot\text{F}_2\text{Ca}$), hidroxiapatita ($3(\text{PO}_4)_2\text{Ca}_3\cdot\text{Ca}(\text{OH})_2$), oxiapatita ($3(\text{PO}_4)_2\text{Ca}\cdot\text{CaO}$) y carbonato apatita ($3(\text{PO}_4)_2\text{Ca}_3\cdot\text{CO}_3\text{Ca}$); y finalmente sulfato de calcio (SO_4Ca) y silicatos aluminicos diversos: feldespatos y anfíboles (Navarro, 2003; Cajuste, 1977).

El calcio se encuentra también en el suelo formando parte de la materia orgánica o combinada con los ácidos húmicos y fosfórica en los humatos y fosfohumatos cálcicos (Navarro, 2003). Por efecto de la meteorización, estos minerales van liberando calcio, que al ser solubilizado puede tener diversos destinos: pérdida por lixiviación, absorbido por los organismos del suelo, adsorbido por el complejo coloidal, o reprecipitado como compuestos cálcicos secundarios, sobre todo en suelos situados en zonas áridas.

En estas regiones, su contenido es generalmente alto, como consecuencia de una pluviometría débil y poca lixiviación. En la mayoría de ellos, el Ca^{2+} se halla presente en una cantidad máxima en el complejo de intercambio, y en sus distintos perfiles se aprecian depósitos importantes de carbonato o sulfato de calcio.

De acuerdo con (Sanz Elorza, Val Falcón, Sánchez Monge, Blanco, & Montañes, 1995), este elemento es el catión más abundante en el complejo de cambio del suelo, pero la proporción utilizable depende del grado de saturación. En numerosos suelos, el calcio fijado en el complejo coloidal y el unido a los compuestos húmicos son las formas naturales más abundantes. Incluso en suelos ácidos casi siempre existen cantidades suficientes para la adecuada nutrición de las plantas cultivadas, sobre todo cuando las especies son poco exigentes. En general para regiones templadas, el calcio intercambiable es diez veces más abundante que el potasio cambiante.

La meteorización de los minerales primarios que contienen Ca^{2+} depende considerablemente de la formación de H^+ en el suelo, los iones hidrogeno y probablemente también agentes quelantes, atacan al Ca^{2+} de las redes cristalinas de los minerales, provocando así la disolución del mineral y liberando al Ca^{2+} (Mengel y Kirkby, 2001).

El contenido de iones totales en la solución del suelo varía según el tipo de este, pero, en la mayoría de los casos, del 60% al 80% del total se encuentra como Ca^{2+} , aunque las raíces aprovechan menos del 3% del calcio disponible, esta cantidad es suficiente para satisfacer las demandas (Barber et al., 1963).

En los suelos ácidos, situados generalmente en zonas con una alta pluviometría, el movimiento de este elemento es más amplio. Se encuentra fundamentalmente adsorbido por los coloides en forma intercambiable y como minerales secundarios no descompuestos. Su contenido, sobre todo en suelos de textura gruesa, es bajo, ya que, al estar sometidos a un continuo y amplio lavado, el agua disuelve las bases solubles que se pierden por lixiviación en gran proporción. Junto a ello hay que añadir el calcio que es desplazado del complejo adsorbente por el hidrógeno y también el captado por las plantas; y aunque parte de estas pérdidas son compensadas por la meteorización de los minerales del suelo, el resultado en un plazo relativamente amplio es el empobrecimiento en el contenido de este elemento. Incluso en aquellos suelos formados por rocas calizas, debido a las circunstancias expuestas, presentan normalmente en su capa superficial esta situación (Mengel y Kirkby, 2001).

La aplicación periódica de cales agrícolas (carbonatos, óxidos o hidróxidos de calcio y magnesio) es la vía más conveniente para corregir los problemas de acidez. Este empobrecimiento en calcio, que como es lógico repercute en la captación del elemento por la planta, está notablemente influenciado por el tipo de coloide predominante en el suelo, y por el porcentaje de calcio intercambiable que contenga.

En la mayor parte de los suelos, las pérdidas de Ca^{2+} depende grandemente de la mayor o menor facilidad de liberación del calcio adsorbido. Al igual que

cualquier otro catión, en este caso las formas intercambiables y en disolución se hallan en equilibrio dinámico. Por lo tanto, si disminuye el contenido de calcio en la disolución, como puede ocurrir por lixiviación o consumo por la planta, parte del calcio adsorbido tiende a pasar a la disolución para restablecer el equilibrio.

Para que este desplazamiento se produzca, las arcillas 1:1 requieren un grado de saturación en calcio mucho menor que aquellas tipo 2:1. Las arcillas caoliniticas precisan tan solo una saturación del 40-50% para que el elemento sea fácilmente liberado, mientras que las montmorilloníticas requieren una saturación del 70% o más para el mismo fin (Millaway y Wiersholm, 1979).

2.3.6. Fosforo (P)

El fósforo (P) es un nutriente esencial y factor limitante del crecimiento de las plantas en suelos con bajo contenido de este elemento (Szogi et al., 2012). La cantidad total de P en la capa arable del suelo puede oscilar entre 200 y 5000 mg kg⁻¹ (Brady y Weil, 2009), pero sólo menos de 1 % está disponible para la planta.

El P es el nutriente que debe ser suministrado casi en su totalidad por el intemperismo del material parental, debido a que presenta un bajo retorno atmosférico (Walker y Syers, 1976). A consecuencia de esto, la principal fuente inicial del P son los minerales primarios, principalmente la apatita. El intemperismo de estos minerales suministra iones fosfato (H_2PO_4^- y HPO_4^{2-}) a la solución del suelo (Cross y Schlesinger, 1995; Whalen y Sampedro, 2010) y posteriormente, las bacterias, hongos y plantas incorporan estos iones fosfato en su biomasa, iniciando con esto la ruta biológica del P (Cross y Schlesinger, 1995).

Desde el punto de vista químico el P puede encontrarse como P inorgánico y como P orgánico. El P inorgánico se clasifica de acuerdo a su disponibilidad para las plantas en: i) P disponible, que es la forma aprovechable en forma inmediata, es decir son fosfatos en la solución del suelo; ii) P intercambiable, también llamado lábil o adsorbido, cuya disponibilidad es más lenta que el anterior; y iii) el P insoluble, que está formando parte de los minerales primarios y secundarios, y constituye la gran reserva de P inorgánico en el suelo (Johnston y Syers, 2009).

Walker y Syers (1976) propusieron un modelo que aún en la actualidad es ampliamente aceptado sobre la evolución del P en el suelo durante la pedogénesis. Este modelo sugiere que la disponibilidad y la oclusión de este nutriente depende de la edad del suelo. Por lo tanto, proponen que en los diferentes estadios del desarrollo del suelo cambia la proporción de las diferentes formas químicas del P. Por ejemplo, este modelo sugiere que, para suelos jóvenes poco intemperizados, la proporción de P en minerales primarios (apatita) será alta en comparación con suelos viejos muy intemperizados, donde dominarán las fracciones de P orgánico (Po) y P inorgánico ocluido (Poc), reduciendo así su disponibilidad.

2.3.7. Potasio (K)

La concentración de K varía entre 1 y 10 mg kg⁻¹ suelo, y puede disminuir por tres razones: a) absorción de las plantas, b) lixiviación a capas inferiores (Havlin et al., 1999); y c) fijación que presentan los minerales de arcillas 2:1 (Fassbender y Bornemisza, 1987). La reposición de este elemento a la solución del suelo es a partir del K intercambiable, retenido electrostáticamente por las cargas negativas que presentan la superficie y los bordes de las láminas de arcilla (Haby et al., 1990).

Entre los factores que determinan la disponibilidad de K⁺ en el suelo se encuentran: la cantidad y el tipo del mineral arcilloso, CIC, el contenido del K⁺ intercambiable, la capacidad del suelo para fijar el K⁺, la humedad, la temperatura, la aireación, el pH y la textura del suelo (Havlin et al., 2014).

2.3.8. Magnesio (Mg)

El magnesio constituye el 1.93% de la corteza terrestre. El contenido total de magnesio en el suelo es variable, por ejemplo, una fracción de 1% corresponde a suelos arenosos de regiones húmedas, hasta quizá varias unidades porcentuales en suelos de textura fina, áridos o semiáridos, formados por materiales ricos en magnesio (Tisdale y Nelson, 1991). Por su parte Cajuste, (1977) menciona que el magnesio ocupa alrededor del 2.7% de la corteza

terrestre y proviene de minerales tales como anfíboles, biotita, dolomita, montmorillonita, olivino, piroxenos, serpentina, vermiculita.

Se encuentra en la solución del suelo y se adsorbe en las superficies de las arcillas y la materia orgánica. El magnesio no es adsorbido tan fuertemente como el calcio por los coloides del suelo y puede perderse fácilmente por lixiviación. Las deficiencias de magnesio ocurren con frecuencia en los suelos ácidos sujetos a alta precipitación y en suelos arenosos (Potash & Phosphate Institute, 1997). Para condiciones ácidas los iones H^+ y Al^{3+} desplazan al magnesio del complejo de intercambio y comúnmente sucede lo ya mencionado, la lixiviación (Fageria, 2009).

El magnesio disponible para las plantas en el suelo está en forma cambiante y/o hidrosoluble. El magnesio puede encontrarse en los suelos en forma algo lentamente disponible, en la que éste se mantiene en equilibrio con el magnesio intercambiable. La formación de estas formas relativamente no disponibles en suelos ácidos sería favorecida por la presencia de grandes cantidades de magnesio soluble en arcillas 2:1 (Tisdale y Nelson, 1991). Fageria (2009) coincide con Tisdale y Nelson, (1991), en las diferentes formas en que el magnesio está presente en el suelo y agrega que la forma en que el magnesio se mueve hacia la planta es a través de flujo de masas y difusión. Las principales fuentes para adicionar Mg^{2+} al suelo son fertilizantes, residuos de cultivos, abonos verdes y liberación del material parental a través del clima. Además, parte del magnesio es fijado por los coloides del suelo y los microorganismos. Una fracción del magnesio se presenta en el suelo en los minerales primarios, otra en formas orgánicas o en forma de complejos orgánicos (menos del 1%) (Fageria, 2009).

2.3.9. Hierro (Fe)

El hierro es un elemento relativamente abundante en el suelo, su concentración varía desde 10,000 hasta 100,000 $mg\ kg^{-1}$ (Mitchel, 1964). En el suelo se encuentra formando parte de diversos minerales, entre los cuales se encuentran: Olivino $[(Fe, Mg)_2\ SiO_4]$, pirita (FeS_2), goetita ($FeOOH$), magnetita (Fe_3O_4)

ferrihidrita, minerales amorfos (Andosoles) (Knezek & Ellis, 1980), siderita (Krauskopf, 1972).

La descomposición de estos minerales durante el intemperismo libera al hierro, precipitándose como óxidos e hidróxidos (Lindsay, 1979) y compuestos más estables como carbonatos, silicatos y sulfatos (Knezek & Ellis, 1980). De estos compuestos sólo una pequeña porción se encuentra en los minerales secundarios de sílice o en formas de complejos con la materia orgánica del suelo (quelatos). Los hidróxidos se forman bajo diversas condiciones, pero su solubilidad depende principalmente del pH del suelo y del tipo de hidróxido (Lucena, 2000).

La fijación del hierro en el suelo se presenta por diferentes mecanismos. El primero de ellos es el bloqueo de la superficie de adsorción de las partículas de minerales del hierro, la cual puede ser bloqueada por fósforo, coprecipitando sobre los hidróxidos de hierro (Olsen, 1972; Torrent et al., 1990).

La disponibilidad del hierro en el suelo, altamente controlada por el pH, disminuye rápidamente cuando el pH está por arriba de 4.0, cantidades muy pequeñas se encuentran a pH por arriba de 6, a menos que el hierro se encuentre complejoado o quelatado. Un pH de 6.5 – 8.0 el Fe^{3+} alcanza su mínima concentración; en el intervalo 7.0 – 9.0 de pH, las especies más abundantes son $\text{Fe}(\text{OH})_2$, $\text{Fe}(\text{OH})_3$ y $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$, la totalidad de las especies inorgánicas no sobrepasan los 10^{-10} mol de Fe L^{-1} en este rango de pH. En suelos normalmente aireados, la forma inorgánica más disponible para las plantas es el ion Fe^{3+} y la actividad de este en la solución es de 1000 veces menor por cada unidad de elevación del pH (Lindsay, 1991).

2.3.10. Cobre (Cu)

Se presenta en los suelos principalmente como ion Cu^{2+} , adsorbido por los minerales arcillosos y ligado por la materia orgánica que tiene una gran capacidad para combinarse fuertemente con el metal. El 98% del Cu en solución está en combinaciones orgánicas. Los suelos orgánicos son deficientes en Cu, debido a

su elevada capacidad de fijación. Dentro de límites razonables de pH, se cree que es un factor que no influye en la disponibilidad.

Se han señalado interacciones antagónicas con el Fe, P, Mo y Zn. Es importante en el crecimiento de las plantas como activador enzimático, en el metabolismo de proteínas, y tal vez en la formación de clorofila.

2.3.11. Zinc (Zn)

Forma parte de los minerales ferro-magnesianos y de sales. Generalmente está más disponible en los suelos ácidos que en los alcalinos. Su disponibilidad será menor cuanto menos meteorizado esté el material, característica de los climas áridos, con pH en el rango de neutro a alcalino. Con valores más altos de pH se forman Zincatos de calcio insolubles, y en suelos alcalinos aumenta un poco la disponibilidad por la existencia de Zincatos de sodio relativamente solubles. Las deficiencias de Zn se dan con más frecuencia en suelos arenosos y en suelos calcáreos. Altos niveles de P provocan deficiencias de Zn. Actúa en las plantas como activador de enzimas.

2.3.12. Manganeso (Mn)

El manganeso (Mn) en la corteza terrestre se encuentra en forma de óxidos, carbonatos y silicatos. Su contenido total en el suelo generalmente varía entre 200 y 3000 mg·kg⁻¹ y se puede encontrar en forma divalente, trivalente o tetravalente. Sin embargo, las formas más oxidadas son menos asimilables para las plantas. Para la nutrición vegetal la forma más importante es Mn²⁺, catión divalente que en condiciones ácidas es adsorbido por minerales arcillosos, mientras que en presencia de elevados contenidos de materia orgánica forma complejos orgánicos (Loué, 1988).

Su disponibilidad para los cultivos está influenciada por los factores del suelo que intervienen en el proceso de oxidorreducción, particularmente el pH, el contenido de materia orgánica, el estado hídrico del suelo y la actividad microbiana. Su disponibilidad es más elevada en los suelos ácidos debido a la solubilización de los compuestos que contienen Mn. A medida que aumenta el valor de pH se

reduce su disponibilidad, ya que por cada aumento en una unidad de pH la concentración de este nutriente se reduce 100 veces; de esta manera en suelos de alta saturación catiónica puede existir mayor sensibilidad a la deficiencia (Fageria et al., 2002; Loué, 1988).

2.3.13. Boro (B)

El boro (B) es muy escaso en la corteza terrestre no se encuentra uniformemente distribuido. El contenido en las rocas ígneas se incrementa con la acidez y en las sedimentarias es más alto y está asociado fundamentalmente con la fracción de arcilla. Es considerado el elemento más móvil entre los microelementos y la fracción soluble es relativamente bajo. El contenido total de boro en el suelo varía de 2 a 200 mg kg⁻¹, sin embargo, sólo una pequeña fracción (3 a 5%) está disponible para los cultivos. El boro asimilable por lo general es menor a 5 mg kg⁻¹ (Arunkumar et al., 2018).

Varios factores limitan el comportamiento y dinámica de este elemento en el suelo, entre ellos, el bajo contenido nativo, la reacción ligeramente ácida a básica del suelo, alta saturación de cationes cambiabiles, demanda creciente por el cultivo y el desbalance nutricional inducido por el uso excesivo de fertilizantes (Carmona et al., 2007).

2.3.14. Nitrógeno total (Nt)

Suelos tropicales. En los suelos con clima tropical, el contenido de nitrógeno varia ampliamente entre 0.02% y 0.04%, en casos extremos, como en los suelos muy ricos en materia orgánica, puede llegar hasta el 2%. Las cantidades de nitrógeno presentes en los suelos están controladas, especialmente, por las condiciones climáticas y la vegetación; estas últimas inciden, además, en las condiciones locales de topografía, en el material parental, en las actividades del hombre y en el tiempo que estos factores han actuado sobre la formación del suelo, es decir, todos los factores de formación inciden finalmente en la cantidad de nitrógeno acumulado en los suelos. El clima tiene una influencia determinante sobre el nivel de nitrógeno en los suelos a través de los efectos de la temperatura

y las condiciones de humedad (régimen de lluvias) sobre el desarrollo de las plantas (Fassbender y Bornemisza, 1987).

Suelos en América Latina. El contenido de nitrógeno total de los suelos varía dentro de grandes límites, en suelos tropicales de América Latina las variaciones encontradas son también amplias. Fassbender y Bornemisza (1987), señala que el contenido de nitrógeno de los suelos volcánicos es más alto que el de las zonas bajas de Brasil. Esto se debe a muchas razones: en las regiones volcánicas se tiene un rejuvenecimiento de los suelos por las cenizas de las erupciones; la formación de los complejos organominerales protege a las sustancias de la mineralización; los microorganismos presentan una actividad equilibrada. En los suelos desarrollados sobre sedimentos meteorizados y deficientes en elementos nutritivos, la acumulación de materia orgánica y nitrógeno son generalmente muy superficiales y bajas, los árboles presentan un sistema radicular poco profundo y son objeto de una degradación rápida cuando se tala y se quema el bosque.

Fassbender y Bornemisza (1987), afirman que, con base en el análisis de 167 muestras de suelos de diferentes sitios de América Central, se observó que el 68.7% de las muestras presentaron un contenido entre 0.1 y 0.4% de nitrógeno y que los valores extremos fueron de 0.05 y 4.71%, pero de manera general el contenido de nitrógeno total es de 0.2 a 0.7% para la capa arable.

2.3.15. Nitrógeno mineral (N_{min})

La descomposición de residuos vegetales y animales tiene dos principales funciones en los ecosistemas: 1) mineralización de los elementos nutrientes y 2) formación de la materia orgánica del suelo. La mineralización ocurre cuando las formas inorgánicas de un elemento (NH₄⁺) son liberadas durante el catabolismo. El paso anterior en la mineralización del N, en la cual las sustancias orgánicas nitrogenadas simples son metabolizadas con la liberación de NH₄⁺, es conocido como amonificación (Haynes, 1986).

La mineralización depende principalmente de las bacterias aerobias y se favorece con un pH neutro, humedad, una buena aireación y un sustrato de

carbono adecuado. El fertilizante nitrogenado tiene algunas veces un efecto preparatorio en la mineralización estimulando el crecimiento bacteriano, así como la labranza promueve la aireación y expone la biomasa a la superficie en donde queda expuesta a la desecación.

En términos relativos, 0.01 a 0.003% del total de la materia orgánica puede ser mineralizada totalmente en un suelo labrado anualmente (Loomis, 2002). Se necesita hacer hincapié en que la mineralización varía, no solamente con el clima y el laboreo, sino también con las cantidades y tipos de residuos o estiércoles que se incorporen al suelo (Loomis, 2002). Según datos de Kolberg, et al., (1997), el 75% del nitrógeno orgánico se mineraliza en los primeros 20 cm y 25% en los estratos más profundos.

En un trabajo realizado en Argentina por Benintende et al., (2008), en un suelo molisol, con 183 mg kg⁻¹ suelo de nitrógeno potencialmente mineralizable, durante el ciclo de un cultivo de maíz en el que las temperaturas del suelo en el horizonte superficial oscilaron entre 16 y 28°C y la humedad entre el 72 y el 99% de la óptima para el proceso de mineralización, se estimó que el N mineralizado en campo en ese período fue de 112 kg N ha⁻¹. Esta cantidad representó el 22% del nitrógeno potencialmente mineralizable y aproximadamente el 3% del nitrógeno total.

2.3.16. Nitratos (NO₃⁻)

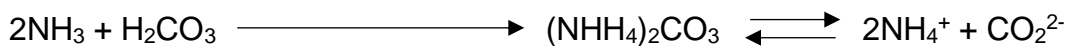
La nitrificación es la oxidación biológica de amonio a nitrito y de este a nitrato. Generalmente es realizada por bacterias autótrofas las cuales derivan de su energía de las oxidaciones de NH₃⁺ y NO₂⁻ y no de la oxidación de compuestos de carbono. Varios géneros de bacterias autótrofas son capaces de oxidar el amonio a nitrito, incluyendo Nitrosomas, Nitrosolobus y Nitrospira, mientras que Nitrobacter parece ser dominante solamente en la oxidación de Nitrito en los ecosistemas terrestres. La nitrificación resulta de la presencia en el suelo de nitrógeno disponible en forma de anión, lo cual no tienen un interés especial debido a que la mayoría de las plantas utilizan los nitratos casi con la misma facilidad que el amonio.

2.3.17. Amonio (NH₄⁺)

La amonificación sucede en todos los suelos con distinta reacción que presenta el ambiente, en presencia de aire o sin él, pero en condiciones anaerobias con reacción fuertemente ácida y con reacción alcalina se retarda demasiado. Sobre la velocidad de amonificación influyen también la temperatura del suelo, la humedad y otros factores. En condiciones anaerobias las sustancias orgánicas hidrogenadas se descomponen hasta amoniaco. En condiciones aerobias las sales de amonio se oxidan hasta los nitratos (Yágodin, 1986).

La mayor parte del amoniaco producido en el suelo forma amonio. Existe una fuerte tendencia a que se forme amonio debido a la presencia de iones hidrógeno en el suelo y al fuerte enlace que se forma entre el amoniaco y el hidrógeno al compartir electrones. El ion amonio tiene una carga positiva de +1 y está disponible para las plantas. El amonio es absorbido sobre el complejo de intercambio de cationes y es retenido contra la lixiviación (Foth, 1985).

El proceso puede ser resumido en las siguientes ecuaciones (Jenkinson y Smith, 1989).



2.4. SUELOS FORESTALES

Un suelo forestal es cualquier suelo que se ha desarrollado bajo la influencia de una cubierta forestal. Este punto de vista reconoce los efectos singulares del arraigamiento profundo de los árboles, los organismos específicos que se relacionan con la vegetación, así como la capa de *litter* y la lixiviación favorecida por los productos de su descomposición en la génesis del suelo (Pritchett, 1986).

Los suelos forestales cubren aproximadamente la mitad de la superficie terrestre, es decir, la mitad de los continentes, de hecho, esencialmente todos los suelos, con excepción de los de tundra, pantanosos, pastizales y desérticos, se han

desarrollado bajo una cubierta forestal y han adquirido algunas propiedades distintivas como resultado de tal asociación (Pritchett, 1986).

2.4.1. Suelos forestales en comparación con suelos cultivados

Los requerimientos del suelo para los cultivos agrícolas a menudo difieren de los requerimientos para los cultivos forestales. No es raro observar que algunos de los sitios altamente productivos en materia forestal son muy malos para uso agrícola debido a su ubicación en relación con los mercados o centros de población. Un drenaje deficiente, laderas pronunciadas o la presencia de piedras voluminosas, son ejemplos de condiciones del suelo que favorecen el uso forestal sobre agrícola (Pritchett, 1986).

Los árboles por lo general se establecen en determinado sitio durante muchos años, hundiendo raíces profundamente en el subsuelo. Durante ese periodo devuelven al suelo cantidades considerables de materia orgánica en forma de hojas y *litter*, así como raíces en descomposición. La capa *litter* y hojarasca ejerce una profunda influencia sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. La sombra de los árboles también cubre el suelo que se mantiene varios grados más fresco que en los suelos agrícolas. La presencia de vegetación forestal y de *litter* también da por resultado condiciones de humedad y de temperatura más uniformes. Cuanto más húmedo sea el clima del suelo, más fomentará el estado ácido resultante de la descomposición y la lixiviación de la capa de la *litter* que a su vez promueve el desarrollo de una población de microflora y fauna más diversificada y activa que las que se hallan en los suelos agrícolas (Pritchett, 1986).

Investigaciones recientes han revelado que las tasas de crecimiento de los árboles pueden aumentarse considerablemente mediante un manejo intensivo, incluyendo la adición de nutrientes vegetales a los suelos deficientes. Sin embargo, las demandas netas de nutrientes de los árboles de los bosques son considerablemente menores que las de la mayor parte de los cultivos agrícolas. Muchos de estos son raros para una región determinada, y por lo general se

cultivan sobre suelos más productivos que han sido modificados de una manera drástica por medio del barbecho, encalado y la fertilización (Pritchett, 1986).

Por lo tanto, los suelos agrícolas pueden describirse como productos artificiales de las actividades humanas, en tanto que los suelos forestales son entidades naturales que manifiestan una sucesión bien definida de horizontes naturales (Pritchett, 1986).

2.5. CAMBIO DE USO DE SUELO

La Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable (LGDFS) (2018), define el cambio de uso de suelo en terrenos forestales como: La remoción total o parcial de la vegetación de los terrenos forestales para destinarlos a actividades no forestales. Esto significa que cualquier actividad realizada en una determinada área cubierta por vegetación, que implique la remoción de esta, se le denominará cambio de uso de suelo.

Soria et al. (1998), denomina el cambio de uso de suelo como los cambios constantes que sufre la superficie terrestre, debido principalmente a la apertura de nuevas tierras agrícolas, desmontes, asentamientos humanos, industrias, construcción de aeropuertos y carreteras, entre otras.

De acuerdo con la SEMARNAT (2012), la alteración de la cubierta vegetal en México ha sido impulsada en gran parte por el crecimiento de la población y la presión que ello implica sobre el aprovechamiento de los recursos naturales y la transformación del paisaje.

Los cambios en la cobertura del suelo son de dos tipos: conversión y modificación, la conversión es un tipo de cobertura a otro y la modificación implica alteraciones en la estructura o función sin mayor cambio de un tipo a otro, por ejemplo, cambios en la productividad de la biomasa. Los cambios en la cobertura del suelo son el resultado de procesos naturales tales como las variaciones climáticas, erupciones volcánicas, cambios en la riberas de los cauces o el nivel del mar, entre otros. Sin embargo, la mayoría de los cambios recientes se deben principalmente a las acciones humanas.

Por el contrario, los cambios de uso del suelo son producidos por la intervención del hombre, modificando la intensidad de uso y mezclando un uso con otro en la misma área (Briassoulis, 2000).

La acelerada pérdida de bosques desde los albores de la humanidad al presente va desde un tercio de su extensión hasta casi la mitad. Este proceso se agudizó durante los últimos dos siglos al cuadruplicarse la población y desaparecer más superficie forestal que durante toda la historia del hombre en la tierra. Actualmente se estima que un tercio de la superficie terrestre continental (3.54 mil millones de ha) aún se encuentran bajo cubierta forestal. La proporción bosque/población, sin embargo, ha venido disminuyendo de 1.2 ha per cápita en 1960 a 0.6 ha per cápita en 1995. Esta desmesurada pérdida de la cubierta vegetal lleva consigo el exterminio del bagaje genético inherente a los ecosistemas autóctonos y el potencial de uso de todos los bienes y servicios ambientales que estos proveen para el bienestar humano (Noble y Dirzo, 1997; Gardner-Outlaw y Engelman, 1999).

En México, la situación es todavía más severa. La media mundial describe que México debería tener alrededor del 0.7 ha per cápita para la presente década. Los datos actuales no obstante indican que el país alberga tan solo un 0.5 ha de cubierta forestal per cápita y de la predicción para el 2025 será de un 0.3 ha per cápita, es decir, estará por debajo de la media mundial (Maser, 1996; Velázquez et al., 2002).

La deforestación es un tema ligado al cambio de uso de suelo. Se han realizado diversos estudios en México referentes a este tema, entre los más importantes se destacan los que se resumen en el Cuadro 5. Sin embargo, cabe mencionar que la determinación de cifras confiables de deforestación y sus causas no es una tarea fácil, debido a problemas técnicos y de disponibilidad de recursos económicos, humanos y de equipo especializado para ello.

Cuadro 5. Datos de la pérdida anual de la superficie forestal en México.

Fuente	Superficie perdida (ha / año)
Grainger, 1984	1,600,000
Repetto, 1988	460,000
FAO, 1988	615,000
Myers, 1989	700,000
Castillo <i>et. al.</i> , 1989	746,000
Toledo, 1989	1,500,000
Masera <i>et. al.</i> , 1992	668,000
SARH, 1992	365,000
SARH, 1994	370,000
FAO, 1995	678,000
FAO, 1997	508,000
Lichtinger, 2001	1,200,000

Fuente: Velázquez et al., 2002.

Hasta 1988 las estimaciones realizadas en México habían sido de carácter subjetivo y carecían de un fundamento estadístico que les diera la confiabilidad necesaria tanto en estimaciones oficiales como de diferentes instituciones cuya variación entre ellas es considerable, lo que ha llevado a crear confusión y desconfianza sobre las estadísticas de deforestación, por lo que, la idea que prevalece indica la gran cantidad de inconsistencias entre las diversas estimaciones para la evaluación de las tasas de pérdida de cubierta forestal, ya que se han hecho infinidad de estudios parciales con objetivos particulares de interés a grupos políticos, instituciones, usando metodologías y técnicas muchas veces inconsistentes (Velázquez et al., 2002).

Las actividades que mayormente promueven el cambio en el uso de suelo son la agricultura y la ganadería; le siguen en importancia el crecimiento urbano y de la infraestructura de comunicaciones y otros servicios. La actividad agropecuaria genera la reducción de bosques y selvas (deforestación) y de otros ecosistemas (matorrales, por ejemplo) por la apertura de terrenos para la cría de ganado o

bien por las prácticas agrícolas que demandan nuevos espacios (SEMARNAT, 2005).

2.5.1. Factores relacionados con el cambio de uso del suelo

El estado y las tendencias del cambio de la biodiversidad están asociados a factores sociales, económicos y políticos, también denominados factores de raíz; que a su vez conducen a factores próximos o directos en los que se incluyen cambios en la cobertura y uso del suelo, la sobreexplotación de organismos, introducción de especies invasoras, el cambio climático antropogénico, entre otros, destacando el uso de suelo como el factor de mayor impacto (Challenger & Dirzo, 2009).

Lambin, Geits y Lepers (2003), encontraron que el cambio de uso de suelo está inducido por una combinación de factores sinérgicos de alto nivel, entre los que se encuentran los siguientes: escasez de recursos que aumentan la presión de la producción sobre éstos; las oportunidades cambiantes creadas por los mercados; la intervención política externa; la pérdida de capacidad de adaptación y mayor vulnerabilidad, y los cambios en la organización, en el acceso a los recursos y las actitudes sociales. Éstos a su vez, se subdividen en causas lentas y rápidas.

Cuadro 6. Descripción de las causas y clasificación de acuerdo con el tiempo en el que éstas actúan sobre el cambio de uso del suelo.

Causa	Causas lentas	Causas rápidas
Escasez de recursos causando presión de la producción sobre esto.	Crecimiento natural de la población y división de las parcelas.	Migración espontánea, desplazamiento forzado de la población, refugiados.
	Cambio de hábitos familiares que conducen a cambios en la disponibilidad.	Disminución en la disponibilidad de la tierra debido a la invasión por otros usos de la tierra (por ejemplo, reservas naturales).
	Pérdida de productividad del suelo en áreas sensibles después del uso excesivo o inapropiado.	
	Fracaso en la restauración o mantenimiento de los	

Causa	Causas lentas	Causas rápidas
	<p>trabajos de protección ambiental.</p> <p>Extracción de excedentes.</p>	
<p>Cambio de oportunidades creadas por los mercados.</p>	<p>Aumento en la comercialización y la agro-industrialización.</p> <p>Mejora en accesibilidad a través de la construcción de carreteras.</p> <p>Cambios en los precios de mercado de los insumos o productos (por ejemplo, disminución de los precios de la producción primaria, términos de intercambio globales o urbano-rurales desfavorables).</p> <p>Oportunidades de empleo y salarios fuera del campo.</p>	<p>Inversiones de capital.</p> <p>Cambios en las condiciones macroeconómicas y comerciales nacionales o mundiales que conducen a cambios en los precios (por ejemplo, aumento de los precios de la energía o crisis financiera mundial).</p> <p>Nuevas tecnologías para la intensificación del uso de los recursos.</p>
<p>Intervención de la política exterior.</p>	<p>Programas de desarrollo económico. Subsidios perversos, distorsiones de precios inducidas por las políticas.</p> <p>Crecimiento de la frontera (por ejemplo, por razones geopolíticas o para promover grupos de interés).</p> <p>Pobre gobernabilidad y corrupción.</p> <p>Inseguridad en la tenencia de la tierra.</p>	<p>Cambios rápidos de política (por ejemplo, devaluación monetaria).</p> <p>Guerra de inestabilidad del gobierno.</p>
<p>Pérdida de capacidad de adaptación y mayor vulnerabilidad.</p>	<p>Empobrecimiento (por ejemplo, deudas familiares progresivas, falta de acceso al crédito, falta de fuentes alternativas y baja capacidad de ahorro).</p>	<p>Conflictos internos.</p> <p>Enfermedad (por ejemplo, VIH).</p> <p>Riesgos asociados con peligros naturales (por ejemplo, que conducen a una pérdida de cosechas, pérdida</p>

Causa	Causas lentas	Causas rápidas
	<p>Rompimiento de redes informales de seguridad social.</p> <p>Dependencia de los recursos externos o de la asistencia.</p> <p>Discriminación social (minorías étnicas, mujeres, miembros de clases menos favorecidas).</p>	<p>de recursos o pérdida de capacidad productiva).</p>
<p>Cambios en la organización social, en el acceso a los recursos y en las actitudes.</p>	<p>Cambios en las instituciones que rigen el acceso a los recursos por parte de los diferentes administradores de la tierra (por ejemplo, cambio de los derechos comunales a los privados, tenencias y títulos).</p> <p>Crecimiento urbano.</p> <p>División de la familia extensa.</p> <p>Crecimiento del individualismo y el materialismo.</p> <p>La falta de educación pública y flujo de información deficiente en el medio ambiente.</p>	<p>Pérdida de los derechos a los recursos ambientales (por ejemplo, expropiación de la agricultura a gran escala, grandes represas, proyectos forestales, turismo y conservación de la vida silvestre), lo que lleva a una marginación ecológica de los pobres.</p>

Fuente: Lambin et al., (2003)

Algunas de las causas fundamentales que conducen al cambio en el uso de suelo son en su mayoría endógenas, como la escasez de recursos, el aumento de la vulnerabilidad y los cambios en la organización social, aunque también pueden estar influidos por factores exógenos. Las otras causas de alto nivel, como las oportunidades cambiantes de mercado y la intervención de políticas, son en su mayoría exógenas, a pesar de que la respuesta de los administradores de la tierra a estas fuerzas externas está fuertemente mediada por factores locales (Lambin et al., 2003).

Las consecuencias más relevantes del cambio en el uso del suelo son la deforestación (cambio permanente de una cubierta dominada por árboles hacia una que carece de ellos), la alteración (también denominada degradación, es una modificación inducida por el humano en la vegetación natural, pero no un reemplazo total de la misma) y la fragmentación (la transformación del paisaje en parches pequeños de vegetación original rodeados de superficie alterada) (SEMARNAT, 2015).

2.6. PLANTACIONES FORESTALES COMERCIALES

Las plantaciones forestales comerciales (PFC) son cultivos de especies forestales de rápido crecimiento o de alto valor comercial, con el fin de comercializar sus productos, además de que contribuyen a generar servicios ambientales, reducir la deforestación y a incrementar la superficie con cubierta arbórea al reincorporar terrenos agropecuarios de baja productividad al uso forestal tal y como lo indica el artículo 78 de la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable, la cual menciona que queda prohibido el establecimiento de plantaciones forestales comerciales en sustitución de la vegetación forestal de los terrenos forestales (LGDFS, 2018).

Además de promover la producción de materias primas las plantaciones forestales comerciales brindan beneficios ambientales como la captura de carbono, la conservación del suelo, la recarga de mantos acuíferos y brindan refugio a la fauna silvestre (CONAFOR, 2018). Otros aportes de las plantaciones forestales comerciales al sector son la restauración de la cobertura arbórea, además son generadoras de alternativas económicas rentables y competitivas para los productores (Zamora Martínez, 2015).

México cuenta con más de 269 mil 600 hectáreas plantadas de diferentes especies maderables, los estados de Veracruz, Tabasco, Campeche, Chiapas y Puebla son líderes en este tipo de plantaciones al concentrar poco más del 65% del total, las especies que generalmente se establecen en estos sistemas son cedro rojo (*Cedrela odorata* L.), caoba (*Swietenia macrophylla* King), eucalipto (*Eucalyptus* sp.), melina (*Gmelina arborea* Roxb. ex Sm.) y teca (*Tectona grandis*

L. f.) (CONAFOR, 2014), cabe mencionar que estas últimas tres son especies introducidas.

Entre los diferentes tipos de plantaciones forestales, se encuentran los árboles de Navidad, en estos sistemas se efectúa un aprovechamiento continuo del recurso, a partir de la primera cosecha que tiene lugar a los seis años de iniciada la plantación. Los productores obtienen ingresos y al mismo tiempo generan beneficios, algunos de estos son los empleos e ingresos temporales y permanentes; servicios ambientales; facilitan la filtración de agua y recarga de los mantos acuíferos; la captura de una gran cantidad de carbono durante el crecimiento de los individuos; y contribuyen en la prevención de la erosión del suelo (Zamora, 2015).

Como se mencionó anteriormente, las PFC se establecen en terrenos que no son aptos para establecer cultivos o en su defecto en sitios que fueron utilizados para la producción agrícola o ganadera y que por ello han perdido su fertilidad, ya que no es permitido remover una cubierta forestal natural para establecer esta actividad; por tal razón, uno de los objetivos que se busca al realizar esta conversión, es la de recuperar los terrenos forestales degradados y, por ende, mejorar las características físicas, químicas y biológicas del suelo

Gómez et al. (2008) estudiaron el efecto del cambio de uso de suelo de un sitio degradado a una con plantaciones forestales, los sistemas que se estudiaron fueron: una sabana natural y dos plantaciones forestales comerciales de pino caribe (*Pinus caribea*) de 3 años y 29 años, evaluaron el contenido de humedad, pH, carbono orgánico total (COT), N total, P total y carbono microbiano (Cmic). Los parámetros estudiados no mostraron un patrón definido en relación con la variabilidad temporal. Hubo mayor preservación del carbono dentro de la biomasa microbiana presente en suelos en plantaciones de pinos. La conversión de sabana a plantaciones de pino caribeño incrementó la calidad del suelo.

Arres et al. (2012) evaluaron los cambios en algunas propiedades del suelo a 18 años de establecida una plantación de *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis* D.K. Bailey en un sitio de uso agrícola. Los resultados mostraron que hubo un aumento

de la materia orgánica, el pH disminuyó, el Na, K, PMP, humedad aprovechable y CC aumentaron sus valores en diferentes proporciones.

Flórez-Flórez et al. (2013) evaluaron el potencial de plantaciones de *Azadirachta indica* A. Juss (Nim) para restaurar tierras degradadas por sobrepastoreo. Tomaron muestras de hojas maduras y de suelos dentro y fuera de las plantaciones, y se determinaron sus contenidos elementales. Los mayores retornos potenciales de nutrientes vía foliar fueron de Ca y N y los menores de P. La mayor liberación de nutrientes fue de K y la menor de N. El P fue el nutriente más limitante, con baja disponibilidad edáfica. La investigación demostró la efectividad de la plantación en el mejoramiento de parámetros edáficos, según incrementos de materia orgánica, P y K. Además, mejoraron la estabilidad de agregados y las tasas de respiración microbiana.

Salgado-García et al. (2015), evaluaron los cambios en las propiedades químicas y físicas de los suelos de la sabana de Huimanguillo, Tabasco, México. Se seleccionaron cuatro plantaciones comerciales de eucalipto con diferentes edades, un pastizal natural y un sitio de vegetación secundaria (acahual). Se realizó el muestreo de suelos de 0 a 10 cm y de 10 a 30 cm de profundidad, para determinar la MO, N, P, K, Ca, Mg, Na, Fe y la textura del suelo. Los resultados indican que los sitios de estudio se ubican en tres subunidades de suelo: pastizal natural y eucalipto (Acrisol Hiperdistri-Férrico); acahual y eucalipto (Acrisol Plíntico); y eucalipto (Acrisol Férrico). Las plantaciones de eucalipto, acahual y pastizal natural conservaron la MO del suelo. El N total se clasificó como rico a excepción de la plantación comercial de eucalipto de 8.4 años, la CIC se clasificó como baja, las concentraciones de P y Na se clasificaron como bajas, las de K, Ca y Mg como muy bajas y las de Fe como altas. La textura del suelo en los diferentes sistemas de producción se clasificó como migajón arcillo arenoso. No se observaron cambios en las propiedades químicas de los suelos acrisoles por el uso del sitio.

Domínguez-Calleros et al. (2017), evaluaron el efecto de las características edafológicas en el crecimiento de una plantación de *Pinus greggii* Englem.

establecida en 2003 en un terreno con suelo degradado y escasa precipitación. El muestreo se realizó en la parte alta, media y baja del sitio, más un testigo. Los resultados encontrados en la caracterización física y química del suelo de acuerdo con el gradiente de pendiente del sitio mostraron que la parte alta presenta los menores valores con diferencia estadística de MO, C, P, K, Ca y Mg respecto a la parte baja. Para el N y pH la parte alta, media, baja y el testigo presentan similitud en valores. La clase textural no presentó modificaciones, a excepción de la parte media en la profundidad de 6-10 cm. La densidad aparente fue menor en la parte media y baja de la plantación

2.7. REFERENCIAS

- Armstrong, A.S.B., Tanton, T.W. (1992). Gypsum applications to aggregated saline sodic clay topsoils. *Journal Soil Science* 43: 249-260. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1992.tb00133.x>
- Arres, C., Márquez, J., Ramírez-García, E. (2012). Algunas modificaciones físicas y químicas del suelo al establecer una plantación de *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis* D.K. Bailey. *Foresta Veracruzana*, 14. pp. 29-34. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49724122005>
- Arunkumar, B. R., Thippeshappa, G. N., Anjali, M. C. & Prashanth, K. M. (2018). Boron: A critical micronutrient for crop growth and productivity. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry* 7(2):2738-2741. Recuperado de: <http://static.plenummedia.com/40767/files/20150523033838-el-boro-como-nutriente-esencial.pdf>. Fecha: 25/03/2019.
- Asgarzadeh, H., Mosaddeghi, M.R., Mahboubi, A.A., Nosrati, A., Dexter, A.R. (2011). Integral energy of conventional available water, least limiting water range and integral water capacity for better characterization of water availability and soil physical quality. *Geoderma* 166 (1), 34–42.
- Assouline, S., Or, D. (2014). The concept of field capacity revisited: defining intrinsic static and dynamic criteria for soil internal drainage dynamics. *Water Resour. Res.* <http://dx.doi.org/10.1002/2014WR015475>.
- Barber, S.A., Walker, J.M., Vasey, E.H. (1963). Mechanisms for Movement of Plant Nutrients from Soil and Fertilizer to Plant Root. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 11: 204–207. <https://doi.org/10.1021/jf60127a017>

- Barthés, B., Roose, E. (2002). Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion validation at several levels. *Catena* 47(2): 133–149. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(01\)00180-1](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(01)00180-1)
- Bartoli, F., Philipp R., Burtin, G. (1988). Aggregation in soils with small amounts of swelling clays: Aggregate stability. *Journal of Soil Science* 39: 593-616. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1988.tb01243.x>
- Benintende, M. C. De Bautista, J.J., Benintende, S.M., Saluzzio, M.F., Muller, C., Sterren, M.A. (2008). Estimación del aporte de nitrógeno del suelo para la fertilización racional de cultivos. *Ciencia, Docencia y Tecnología*, 19°, (37): 143, 144.
- Benton, J. J. Jr. (2003). *Agronomic handbook. Management of crops, soils, and their fertility.* CRC PRESS. Boca Raton. London. New York. Washington, D.C. USA. 450 p.
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (1999). *The Nature and Properties of Soils* (12th ed.; P. Education, Ed.). New Jersey, USA.
- Brady, N.C., Weil, R. R. (2008). *The Nature and Properties of Soils*, 14th ed. Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, NJ, USA.
- Brady, N. C., and R. R. Weil. (2009). *Elements of the Nature and Properties of Soils.* Prentice Hall, Inc. New Jersey, USA. 614 p.
- Briassoulis, H. (2000). Analysis of land use change: Theoretical and modeling approaches. In *The Web book of regional science.* ed. Scott Loveridge. Morgantown, MV: Regional Research Institute, West Virginia University.
- Bronick CJ, Lal R. (2005). Soil structure and management: a review. *Geoderma* 124(1-2): 3–22. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.03.005>
- Cajuste L.J. (1977). *Química de suelos, Colpos-Chapingo, México*, pag.277.
- Calvache, M. (1982). Influencia de la materia orgánica sobre la evapotranspiración del cultivo de fréjol. *Memorias del Coloquio Regional sobre Materia Orgánica do solo.* CENA/USP Piracicaba, Sao Paulo, Brasil, 16 p.
- Calvache, M. (2009). *Física de suelos.* Universidad Central del Ecuador, Facultad de ciencias Agrícolas 123 p.
- Cammeraat LH, Imeson AC. (1998). Deriving indicators of soil degradation from soil aggregation studies in southeastern Spain and southern France. *Geomorphology* 23(2–4): 307–321. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(98\)00012-9](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(98)00012-9)
- Carmona, M. A., Díaz M, M. & Mira C, J. (2007). Compatibilidad de fungicidas en mezcla con micronutrientes quelatados en la zona de Urabá para el control de la *Zigatoka* negra el cultivo del banano. *Asociación de Bananeros de*

- Colombia Augura. Centro de Investigaciones del banano Cenibanano, Cosmoagro. pp. 27.
- Castellanos J.Z., Uvalle B.J.X. y Aguilar S.A. (2000). Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas. INCAPA, México.
- Challenger, A., R. Dirzo. (2009). Factores de cambio y estado de la biodiversidad, en Capital natural de México, vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio. Conabio, México, pp. 37-73.
- Chappell, N.A., Ternan, J.L., Bidin, K. (1999). Correlation of physicochemical properties and sub-erosional landforms with aggregate stability variations in a tropical Ultisol disturbed by forestry operations. *Soil & Tillage Research* 50(1): 55-71. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(98\)00196-2](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(98)00196-2)
- Childs, E.C. (1957). The physics of land drainage. In: Luthin, J.N. (Ed.), *Drainage of Agricultural Lands*. Am. Soc. Agron., Monogr. 7, Madison, WI pp. 1–78. <http://dx.doi.org/10.2134/agronmonogr7.c1>.
- Colman, E.A. (1947). A laboratory procedure for determining the field capacity of soils. *Soil Sci.* 63, 277–283.
- CONAFOR. (2014). México cuenta con 270 mil hectáreas de Plantaciones Forestales Comerciales. Comisión Nacional Forestal, Boletín 77.
- CONAFOR. [conafor.gob]. (2018, noviembre 1). Plantaciones Forestales Comerciales [archivo de video]. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=xtEXB9ib8Zg>
- Cross, A. F. and W. H. Schlesinger. (1995). A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems. *Geoderma* 64: 197-214.
- Czarnes, S., Hallett, P.D., Bengough, A.G., Young, I.M. (2000). Root- and microbial-derived mucilages affect soil structure and water transport. *European Journal of Soil Science* 51: 435 – 443.
- Dictionary of Geotechnical Engineering. (2014). Field (Moisture) Capacity. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Dimoyiannis, D.G., Tsadilas, C.D., Valmis, S. (1998). Factors affecting aggregate instability of Greek agricultural soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 29: 1239 – 1251. <https://doi.org/10.1080/00103629809370023>
- Domínguez-Calleros, P.A., Rodríguez-Laguna, R., Capulín-Grande, J. Razo-Zárate, R. Díaz-Vázquez, M.A. (2017). Influencia de factores edáficos en el crecimiento de una plantación de *Pinus greggii* Engelm. en Santiago de Anaya, Hidalgo, México. *Madera y Bosques*, 23 (2): 145-154. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61752760010>
- Edward, J. P. (2000). La ciencia del suelo y su manejo. Editorial Paraninfo. Madrid, España. 405 p.

- Encyclopedia of Soil Science. (2008). Field capacity. In: Chesworth, W. (Ed.), Encyclopedia of Soil Science. Encyclopedia of Earth Sciences Series Springer, Dordrecht. <https://doi.org/10.2136/sssaj2008.0003br>
- Fageria, N. K. (2009). The Use of Nutrients in Crop Plants. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Fageria, N.K., Baligar, V.C., Clark, R.B. (2002). Micronutrients in Crop Production. Advances in Agronomy, 77: 185-268. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(02\)77015-6](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(02)77015-6)
- FAO. (2017). Mapa de carbono orgánico del suelo. Versión 1.2.0.
- FAO. (2020). Portal de Suelos de la FAO. Recuperado el 22 de marzo de 2020, de Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura website: <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/clasificacion-de-suelos/sistemas-numericos/propiedades-quimicas/es/>
- Fassbender, H. W. y E. Bornemisza. (1987). Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. San José, Costa Rica.
- Flórez-Flórez, C.P., León-Peláez, J.D., Osorio-Vega, N.W., Restrepo-Llano, M.F. (2013). Dinámica de nutrientes en plantaciones forestales de *Azadirachta indica* (Meliaceae) establecidas para restauración de tierras degradadas en Colombia. Revista de Biología Tropical, 61 (2): 515-529.
- Foth, H. D. (1985). Fundamentos de la ciencia del suelo. Ed. CECOSA. México. pp. 300-309.
- Gardner-Outlaw, T., and R. Engelman. (1999). Forest futures, population, consumption and wood resources. Pop. Action Int., Washington, DC.
- Gisbert-Blanquer, J. M., Ibáñez Asensio, S. & Moreno Ramón, H. (2010). La textura del suelo. Universidad Politecnica de Valencia.
- Givi, J., Prasher, S.O., Patel, R.M. (2004). Evaluation of pedotransfer functions in predicting the soil water contents at field capacity and wilting point. Agr. Water Manag. 70 (2), 83–96.
- Glossary of Soil Science Terms. (2008). Field water capacity. In: Soil Science Glossary Terms Committee. Glossary of Soil Science Terms. Soil Sci. Soc. Am., Madison, pp. 92.
- Gómez, Y., Paolini, J., Hernández, O.M. (2008). Sustitución de la sabana nativa con plantaciones de *Pinus caribaea* (Pinaceae) en Venezuela: efecto sobre parámetros indicadores de cambios en el carbono del suelo. Revista de Biología Tropical 56 (4): 2041-2053.
- González-Cervantes, G., I. Sánchez-Cohen y J. P. Rossignol. (2004). Morfología de los poros de circulación preferencial del agua en el suelo mediante

- técnicas de análisis de imagen. Caso de una cuenca del norte de México. *Ing. Hidrául. Méx.* 19: 15-23.
- Groenevelt, P.H., Grant, C.D., Semetsa, S. (2001). A new procedure to determine soil water availability. *Aust. J. Soil Res.* 39 (3), 577–598.
- Haby, A. V., M. P. Russelle, and E. O. Skogly. (1990). Testing soil for potassium, calcium and magnesium. pp. 181-227. In: R. L. Westerman, R. L. (eds.). *Soil testing and plant analysis*. Soil Science Society of America. Madison, WI, USA.
- Hamblin, A.P. (1985). The influence of soil structure on water movement, crop root growth and water uptake. *Advances in agronomy.* 38:95–158.
- Havlin, J. L., S. L. Tisdale, W. L. Nelson, and J. D. Beaton. (1999). *Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management*. Prentice-Hall. Upper Saddle River, NJ, USA.
- Havlin, J.L., Tisdale, S.L., Nelson, W.L. and Beaton, J.D. (2014). *Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management*. 8 ed. New Jersey (USA). 516 p.
- Haynes, R.J. (1986). *Mineral nitrogen in the plant-soil system*. Academic Press, Inc. New York.
- Hillel, D. (1998). *Environmental soil physics*. Academic Press, San Diego Cal. E.U.A. 101-123.
- Hodgson, J. M. (1987). *Muestreo y descripción de suelos*. Editorial Revelé, España.
- Hosseini, F., Mosaddeghi, M.R., Hajabbasi, M.A., Sabzalian, M.R. (2016). Role of fungal endophyte of tall fescue (*Epicloë coenophiala*) on water availability, wilting point and integral energy in texturally-different soils. *Agr. Water Manag.* 163, 197–211.
- INTAGRI. (2018). Disponibilidad de Nutrimientos y el pH del Suelo. Serie Nutrición Vegetal. Núm. 113. Artículos Técnicos de INTAGRI. México. 4 p. Extraído de <https://www.intagri.com/index.php/articulos/nutricion-vegetal/disponibilidad-de-nutrimientos-y-el-ph-del-suelo>
- Jenkinson, D.S., Smith, K.A. (1989). *Nitrogen efficiency in agricultural soils*. London: Elsevier.
- Johnston, A.E., and J.K. Syers. (2009). A new approach to assessing phosphorus use efficiency in agriculture. *Better Crops* 93(3):14-15.
- Kay, B.D. (1998). Soil structure and organic carbon: a review. In: Lal, R., Kimble, J.M., Follett, R.F., Stewart, B.A. (Eds.), *Soil Processes and the Carbon Cycle*. CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 169 – 197.
- Kirkham, M.B. (2005). *Principles of Soil and Plant Water Relations*. Elsevier Academic Press, pp. 500.

- Knezek, B.D., Ellis, B.G. (1980). Essential micronutrients IV: Copper, Iron, Manganese and Zinc. In 'Applied Soil Trace Elements'. (ed. Davies, B.E.). pp. 259-286. John Wiley and Sons, Chichester.
- Kolberg, R.L., B. Rouppel, D.G. Wesfall y G.A. Peterson. (1997). Evolution of net soil nitrogen mineralization method in dryland agroecosystems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 504-508.
- Krauskopf, K. B. (1972). Geochemistry of micronutrients. In: *Micronutrients in agriculture*. J. J. Mortvedt, P. M. Giordano and W. L. Lindsay. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin.
- Kutílek, M. (2004). Soil hydraulic properties as related to soil structure. *Soil Tillage Res.* 79: 175-184.
- Kutílek, M., Nielsen, D.R. (1994). *Soil Hydrology*. Catena Verlag, Cremlingen-Destedt, Germany.
- Lal, R., Shukla, M.K. (2004). *Principles of Soil Physics*. Marcel Dekker, Inc., New York, NY.
- Lambin, E. F., Geist, H. J., & Lepers, E. (2003). Dynamics of land-use and land-cover change in tropical regions. *Annual review of environment and resources*, 28(1), 205-241.
- Le Bissonnais, Y. (1996). Aggregate stability and measurement of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science* 47: 425-437. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1996.tb01843.x>
- Levy G. J.; Van Der Watt, H. V. H.; Du Plessis, H. M. (1988). Effect of sodium-magnesium and sodium-calcium systems on soil hydraulic conductivity and infiltration. *Soil Science* 146: 303-310.
- Levy G. J.; Van Der Watt, H. V. H. (1990). Effect of exchangeable potassium on the hydraulic conductivity and infiltration rate of some South African soils. *Soil Science* 149: 69- 77.
- LGDFS. Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable. (2018). publicada en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 05 de junio del 2018, texto vigente a partir de la última reforma publicada en el DOF 05-06-2018. Recuperada en enero del 2020 de <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/index.htm>
- Lindsay, W.L. (1979). *Chemical equilibria in soils*. Ed. John Wiley & Sons Inc. NY, USA. 67
- Lindsay, W.L. (1991). Iron oxide solubilization by organic matter and its effects on iron availability. *Plant and Soil* 130: 27-34. https://doi.org/10.1007/978-94-011-3294-7_2
- Lizcano, R., & Olivera, D. (2017). (PDF) Muestreo de suelos, técnicas de Laboratorio e interpretación de análisis de suelos. Retrieved from

https://www.researchgate.net/publication/323823646_Muestreo_de_Suelos_Tecnicas_de_Laboratorio_e_Interpretacion_de_Analisis_de_Suelos

- Loomis R. S. (2002). *Ecología de cultivos. Productividad y manejo en sistemas Agrarios*. Ediciones Mundi-Prensa. España.
- Mitchel, R. G. (1964). Trace elements in soils. In: *Chemistry of the soil*. Ed. F. E. Bear. ACS monograph No. 160, Reinhold Publishing Corp. NY.
- Navarro, G. (2003). *Química Agrícola*, Ed. Mundi-prensa, Madrid, España, pag. 15-32.
- Noble, I.R., Dirzo, R. (1997). Forests as Human-Dominated Ecosystems. *Science*, 277: 522-525. <https://doi.org/10.1126/science.277.5325.522>
- Oades, J.M. (1993). The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. *Geoderma* 56(1-4): 377-400. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(93\)90123-3](https://doi.org/10.1016/0016-7061(93)90123-3)
- Olsen, S.R. (1972). Micronutrient interactions. In: *Micronutrients in agriculture*. Soil Science Society of America, Madison, pp. 243-264.
- Pires, L. F., A. M. Cásaro, K. Reichardt, and O. S. Bacchi. (2008). Soil porous system changes quantified by analyzing soil water retention curve modifications. *Soil Tillage Res.* 100: 72-77.
- Porta, J., López-Acevedo, M., Roquero, C. (1999). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. 2ª edición. Ediciones Mundi-prensa. Bilbao. España. 849 p.p.
- Potash and Phosphate institute. (1997). *Manual de interpretación de fertilidad de suelos*. Atlanta, Georgia, USA.
- Pritchett, W. L. (1986). *Suelos Forestales. Propiedades, conservación y mejoramiento*. Editorial Limusa. México. 634 pp.
- Ratliff, L.F., Ritchie, J.T., Cassel, D.K. (1983). Field-measured limits of soil water availability as related to laboratory-measured properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47, 770–775.
- Roberts, T. L. y Henry J. L. (2001). *El muestreo de suelos: Los beneficios de un buen trabajo*. Potash and Phosphate Institute, Información Agronómica No. 42 Department of Soil Science, University of Saskatchewan. Canada. pp 8.
- Romano, N., Santini, A. (2002). Water retention and storage: field. In: Dane, J.H., Topp, G.C. (Eds.), *Methods of Soil Analysis, Part 4: Physical Methods*. Soil Science Society of America, Madison, WI, pp. 721–738.
- Salgado-García, S., Palma-López, D.J., Martínez, S., Zavala-Cruz, J., Lagunes-Espinoza, L.C. (2015). Cambios en las propiedades del suelo en plantaciones de eucalipto de Tabasco, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 2 (5): 163-172. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=358638159004>

- Sanz Elorza, M., Val Falcón, J., Sánchez Monge, M., Blanco, A., & Montañes, I. (1995). El calcio nutriente para las plantas: Bitter pit en manzano. *Anales de La Estación Experimental de Aula Dei*, (21), 189–202.
- Saxton, K.E.; Rawls, W.J.; Romberger, J.S. and Papendick, R.I. (1986). Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50: 1031- 1036.
- SEMARNAT. (2005). *Indicadores básicos del desempeño ambiental de México: 2005*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- SEMARNAT. (2012). *Inventario nacional de gases de efecto invernadero 1990-2010*, México, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales / Instituto Nacional de Ecología.
- SEMARNAT. (2015). *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave, de Desempeño Ambiental y de Crecimiento Verde. Edición 2015*. Semarnat, México.
- Schnitzer, M. (1991). Soil organic matter - the next 75 years. *Soil Sci.* 151: 41-58.
- Soil Survey Staff. (1999). *Soil Taxonomy: A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys*, Agric. Handb., vol. 436, 2nd ed., 869 pp., U. S. Dep. of Agric., Washington, D. C.
- Soria, R.J., C.A. Ortiz-Solorio, F. Islas G. y V. Volke H. (1998). *Sensores remotos, principios y aplicaciones en la evaluación de los recursos naturales: Experiencias en México*. Publicación Especial 7. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Chapingo, México.
- Stern, R., Ben-Hur, M., Shainberg, I. (1991). Clay mineralogy effect on rain infiltration, seal formation and soil losses. *Soil Science* 152: 455-462.
- Stevenson, F. J. (1982). *Humus Chemistry. Genesis, Composition, Reactions*. John Wiley and Sons. New York. 443 p.
- Swenson, L.J., W.C. Dahnke, and D.D. Patterson. (1984). *Sampling for soil testing*. North Dakota State University, Dept. of Soil Sci., Res. Report No. 8.
- Szogi, A. A., P. J. Bauer, and M. B. Vanotti. (2012). Vertical distribution of phosphorus in a sandy soil fertilized with recovered manure phosphates. *J. Soils Sediments* 12:334-340.
- Tisdale, S. L. y Nelson, W. L. (1991). *Fertilidad de los suelos y fertilizantes*. Editorial Limusa. México. D. F. 760 p.
- Tisdall, J.M. (1991). Fungal hyphae and structural stability of soil. *Australian Journal of Soil Research* 29(6): 729-743. <https://doi.org/10.1071/SR9910729>
- Tisdall, J.M. (1994). Possible role of soil microorganisms in aggregation in soils. *Plant Soil* 159, 115–121. <https://doi.org/10.1007/BF00000100>

- Tisdall, J.M., Oades, J.M. (1982). Organic matter and water-stable aggregates. *J. Soil Sci.* 33, 141–163. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1982.tb01755.x>
- Torrent, J., Barron, V., Schwertmann, U. (1990). Phosphate adsorption and desorption by goethites differing in crystal morphology. *Soil Science Society of America Journal*, 54: 1007-1012. <https://doi.org/10.2136/sssaj1990.03615995005400040012x>
- Townend, J., Reeve, M.J., Carter, A. (2000). Water release characteristic. In: Smith, K.A., Mullins, C.E. (Eds.), *Soil and Environmental Analysis: Physical Methods*, 2nd ed. Marcel Dekker, Inc., New York, NY, pp. 95–140.
- Tuller, M. and D. Or. (2002). Unsaturated hydraulic conductivity of structured porous media. *Vadose Zone J.* 1: 14-37.
- Veihmeyer, F.J., Hendrickson, A.H. (1931). The moisture equivalent as a measure of the field capacity of soils. *Soil Sci.* 32, 181–193. <http://dx.doi.org/10.1097/00010694-193109000-00003>.
- Velázquez, A., & Mas, J. F., & Díaz Gallegos, J. R., & Mayorga Saucedo, R., & Alcántara, P. C., & Castro, R., & Fernández, T., & Bocco, G., & Ezcurra, E., & Palacio, J. L. (2002). Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México. *Gaceta Ecológica*, (62),21-37. [fecha de Consulta 25 de Junio de 2020]. ISSN: 1405-2849. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=539/53906202>
- Walker, T. W. and J. K. Syers. (1976). The fate of phosphorus during pedogenesis. *Geoderma* 15: 1-19.
- Warrick, A.W. (2002). *Soil Physics Companion*. CRC Press LLC, Boca Raton, USA.
- Whalen, J. K. and L. Sampedro. (2010). *Soil ecology and management*. CABI
- Webster, R. (2008). Regression and functional relations. *European Journal of Soil Science*, 48(3), 557–566. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1997.tb00222>.
- Yágodin, B. A. (1986). *Agroquímica*. Trad. al español por R. Rincón-Zabaco y F. Vargas-Salazar. Tomo I Ediciones MIR, Moscú. pp. 120
- Zamora Martínez, M. C. (2015). Producción de árboles de Navidad. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 6(32): 4-6.

3. COMPARACIÓN DE TRES MÉTODOS DE MUESTREO EN SUELOS FORESTALES PARA LA DETERMINACIÓN DE SUS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS.

3.1. RESUMEN/ABSTRACT

El objetivo del muestreo de un suelo forestal es obtener un valor representativo de las diversas variables de interés. Para lo anterior es posible utilizar muestras simples y muestras compuestas, pero la mayoría de las veces se elige solo utilizar un método de muestreo en función del tiempo y la cantidad de recursos humanos y económicos, sin embargo, no se conoce si existen diferencias en los resultados obtenidos al utilizar uno u otro. Para conocer si las diferencias entre los valores medios de las variables bajo estudio obtenidos por diferentes métodos de muestreo son significativas, es necesario realizar una comparación de los métodos con bases estadísticas. El objetivo de este estudio fue determinar las diferencias en los valores medios de las variables físicas y químicas obtenidos con los métodos de muestreo simple y compuesto, en tres sistemas forestales y determinar cuál de los métodos presenta los menores coeficientes de variación (CV). Para ello, se seleccionaron tres sistemas forestales con diferente manejo, denominados Loma de en medio (LE), Santa María (SM) y el Ocotal (OC). En cada sistema se eligieron tres áreas de muestreo al azar denominadas conglomerados, en cada conglomerado se tomaron tres muestras de suelo simple externas (SE), cinco muestras simples internas (SI) y una muestra compuesta (CO), todas a una profundidad de 30 cm. En laboratorio se determinaron 12 propiedades físicas y 18 propiedades químicas, 30 en total. Con los valores obtenidos en laboratorio se aplicó un análisis de varianza (ANVA) para determinar si existían diferencias estadísticamente significativas entre los métodos de muestreo aplicados. Utilizando el CV para cada variable se determinó cuál de los métodos de muestreo fue más preciso. Los resultados obtenidos fueron que en el sistema LE se encontraron tres propiedades químicas con diferencias estadísticamente significativas entre los métodos, en el sistema

SM hubo una propiedad física y seis propiedades químicas con diferencias significativas, y para el sistema OC solo se encontraron seis propiedades químicas con diferencias significativas por efecto del método de muestreo. De esta investigación se concluyó que, cuando se usan diferentes métodos de muestreo, las propiedades químicas son las más susceptibles a mostrar diferencias significativas, por efecto de los métodos, en comparación de las físicas. Para las variables físicas el mejor método de muestreo fue el CO debido a que mostró los menores coeficientes de variación de sus valores en los tres sistemas. Para las variables químicas el mejor método de muestreo fue el SI en dos sistemas y el SE en un sistema.

Palabras clave: suelo forestal, plantación forestal, bosque de coníferas, muestreo, edafología.

COMPARISON OF THREE SAMPLING METHODS IN FOREST SOILS TO DETERMINE THEIR PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES.

The objective of sampling a forest floor is to obtain a representative value of the various variables of interest. Towards the above it is possible to use simple samples and composite samples, but most of the time it is chosen to only use one sampling method based on time and the human and economic amount resources, however, it is not known if there are differences in the results obtained by using one or the other. To know if the differences between the mean values of the variables under study obtained by different sampling methods are significant, it is necessary to make a comparison of the methods with statistical bases. The objective of this study was to determine the differences in the mean values of the physical and chemical variables obtained with the simple and compound sampling methods, in three forest systems and to determine which of the methods has the lowest coefficients of variation (CV). For this, three forest systems with different management were selected, called Loma de en medio (LE), Santa María (SM) and Ocotol (OC). In each system, three random sampling areas called clusters

were chosen, in each cluster three external simple soil samples (SE), five internal simple samples (SI) and one composite sample (CO) were taken, all at a depth of 30 cm. In the laboratory 12 physical properties and 18 chemical properties were determined, 30 in total. An analysis of variance (ANVA) was applied with the values obtained in the laboratory to determine if there were statistically significant differences between the applied sampling methods. Using the CV for each variable, it was determined which of the sampling methods was more accurate. The obtained results were that in the LE system three chemical properties were found with statistically significant differences between the methods, in the SM system there was one physical property and six chemical properties with significant differences, and for the OC system only six chemical properties were found with significant differences due to the sampling method effect. From this investigation it was concluded that, when different sampling methods are used, the chemical properties are the most susceptible to show significant differences, due to the methods effect, compared to the physical ones. For physical variables, the best sampling method was CO because it showed the lowest variation coefficients of its values in the three systems. For chemical variables, the best sampling method was SI in two systems and SE in one system.

Keywords: forest land, forest plantation, coniferous forest, sampling, edaphology.

3.2. INTRODUCCIÓN

El término “muestra” se refiere a las pequeñas porciones de suelo tomadas para representar un horizonte u otra parte del perfil (Webster, 2008). Normalmente, las muestras se obtienen de los horizontes del perfil, el tamaño y forma de la muestra depende de su finalidad. Deben ser lo suficientemente grandes para incluir y representar las características que se desean examinar. El análisis de suelos es una herramienta fundamental para determinar la fertilidad y potencial del suelo de cualquier área geográfica (Lizcano & Olivera, 2017).

Los errores en el muestreo de suelos son de 3 a 6 veces superiores a los errores durante el análisis de laboratorio (Carretero et al., 2016), por tal razón, la utilidad

de un análisis de suelo dependerá principalmente, de que la muestra analizada haya sido correctamente tomada del suelo (Brady & Weil, 1999). Existen dos tipos típicos de muestreo de suelo: el muestreo simple y el muestreo compuesto. La muestra simple es la obtenida de una sola extracción. Son usadas en suelos muy homogéneos. Se recomienda tomar una muestra de un kg por hectárea suelo. La muestra compuesta se refiere a la muestra de suelo obtenida de varias extracciones o muestras simples, reunidas en un recipiente y luego bien mezcladas, de donde se retira un kg de suelo. Es el muestreo más utilizado para planificar fertilización. Se recomienda entre 6 y 12 submuestras por unidad de muestreo (Mendoza & Espinoza, 2017), aunque algunos autores sugieren tomar de 15 a 20 submuestras (Gutiérrez, 1997; Ruíz, 1997). La selección del sitio para realizar el muestreo toma en consideración que tenga características homogéneas. En pendientes mayores al 8% es recomendable dividir la parcela en parte alta, media y baja. En suelos de planicie, no es recomendado muestrear áreas superiores a diez hectáreas en cultivos anuales, y veinte hectáreas en cultivos perennes y pasturas. Es importante tener un testigo representativo del área de muestreo; a nivel de paisaje éste puede ser una parcela inalterada de bosque o una milpa tradicional (Mendoza & Espinoza, 2017). Para tener una mejor comprensión del muestreo de suelos, es importante diferenciar entre exactitud y precisión (Swenson et al., 1984). La exactitud indica que tan cercano está el valor del análisis de suelo al del contenido real del campo, y la precisión describe la reproducibilidad de los resultados. Tanto la precisión como la exactitud están determinadas por el número de submuestras tomadas en el campo. Los métodos con muestreos de altos niveles de precisión y exactitud garantizan una muestra compuesta que representa el campo y cuyos resultados son reproducibles consistentemente cuando se remuestrea el sitio. Investigaciones conducidas en este tópico demuestran que la exactitud aumenta con el número de submuestras tomadas (Roberts y Henry, 2001). Por lo anterior, en esta investigación se planteó el objetivo de comparar la precisión de tres métodos de muestreo para la determinación de propiedades físicas y químicas

de suelos forestales, estos fueron: muestreo simple externo (MSE), Muestreo simple interno (MSI) y muestreo compuesto (MCO).

3.3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.3.1. Área de estudio

Los sistemas bajo estudio se encuentran dentro del polígono del núcleo agrario “Bienes Comunes de San Gerónimo Zacapexco”, ubicado al suroeste de la cabecera municipal de Villa del Carbón que se localiza al noroeste del Estado de México, en las coordenadas extremas siguientes: máximas 19°54'24" latitud norte y 99°39'07" longitud oeste; mínimas 19°36'48" latitud norte y 99°22'21" longitud oeste.

El municipio presenta tres características de relieve: la primera corresponde a las zonas accidentadas y abarca el 57% de la superficie; la segunda está integrada por zonas semiplanas y comprende el 34% y la tercera corresponde a zonas planas que aglomera el 9% de la superficie.

Villa del Carbón se encuentra a 2,600 msnm (msnm: metros sobre el nivel del mar). El cerro de La Bufa es la parte más alta, se sitúa a 3,600 msnm y la mínima la presenta la presa Taxhimay a 2,300 msnm. La cabecera municipal se localiza a 2,595 msnm. La temperatura máxima es de 22.2 °C, la mínima de 7.6 °C y la media normal es de 14.9 °C. la precipitación media anual es de 1089 mm (CONAGUA-SMN, 2015). En el Cuadro 7 se muestra las características de los tres sistemas bajo estudio.

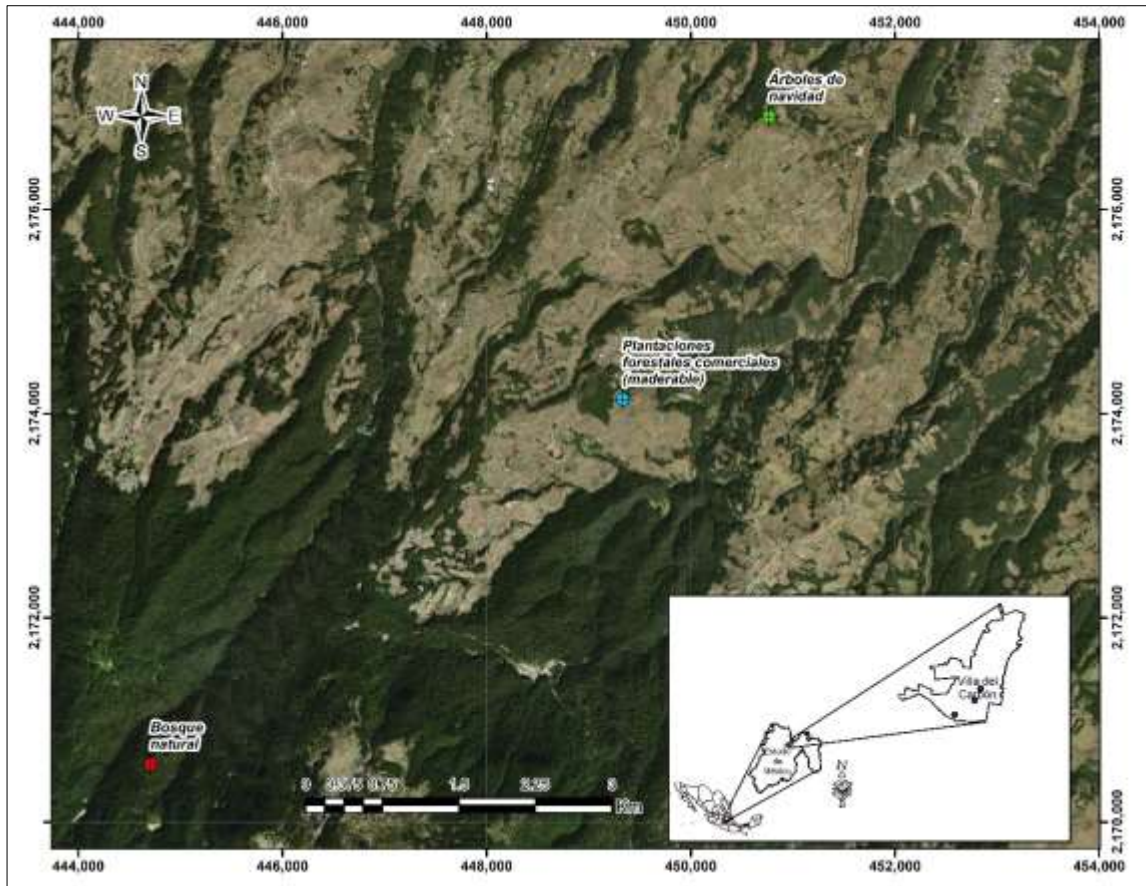


Figura 1. Ubicación de los sistemas en el municipio de Villa del Carbón, México.

Cuadro 7. Datos de los sistemas.

Nombre del sistema	Loma de Enmedio (LE)	Santa María (SM)	Ocotal (OC)
Uso de suelo y vegetación	Bosque natural	Plantación maderable	Árboles de navidad
Área (ha)	76	19	3.5
Altitud (msnm)	3,093	2,798	2,730
Latitud N	19° 37'46.14"	19° 39'42.86"	19° 41'13.05"
Longitud W	99° 31'38.53"	99° 29'00.043"	99° 28'11.17"

3.3.2. Metodología de muestreo

El trabajo se realizó en tres sitios de uso forestal con diferente manejo, denominados sistemas, los cuales fueron: Loma de en Medio (LE), Santa María (SM) y el Ocotal (OC).

El sistema LE, es el espacio con mayor altura sobre el nivel del mar, nula manipulación y manejo silvícola, desde 1994 es considerado como reserva de

germoplasma (huerto semillero), por tal razón predomina una vegetación clímax característica de los bosques de coníferas.

El sistema SM, es el predio localizado con mayor cercanía a la población, por ende, con manipulación muy visible, cuenta con cobertura de árboles maderables, principalmente coníferas de rápido crecimiento, como lo es *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham., *P. ayacahuite* Ehrenb. ex Schltdl. y *P. montezumae* Lamb., las plantaciones cuentan con una altura promedio de 18 m, un tiempo de establecimiento de 15 a 20 años aproximadamente y una distancia entre plantas de 3 m, el manejo silvícola que se aplica en estas plantaciones son labores culturales de control de malezas, podas sanitarias, formativas y de aclareo, además de brechas cortafuego, para el control y manejo de incendios forestales.

El sistema OC, es el predio con mayor perturbación antropogénica, con más de cincuenta años de desmonte y abierto al cultivo de granos básicos y dos décadas con plantación comercial de árboles navideños de las especies *P. ayacahuite* Ehrenb. ex Schltdl. y *Pseudotsuga menziessi* (MIRB.), las prácticas silvícolas aplicados a esta plantación son principalmente las podas para dar la formación cónica típico del árbol de navidad, el control de malezas que se realiza generalmente es de forma manual, el control de plagas y enfermedades con la aplicación de fungicidas y plaguicidas de contacto, fertilización con DAP a razón de 300 kg hectárea⁻¹, considerando que están sembrados en pendiente a una distribución de 2.5 m entre hileras y 1.5 m entre plantas, bajo un sistema de plantación en marco real.

En cada sistema se eligieron al azar tres áreas de referencia denominadas conglomerados con una dimensión de 25x25 m. En cada conglomerado se formó una cuadrícula con puntos equidistantes cada 5 m, teniéndose 36 nodos. Los conglomerados sirvieron de referencia para tomar tres tipos de muestras; las primeras denominadas simples externas (SE) fueron ubicadas tomando como referencia los conglomerados trazando en cada uno de los tres lados a contrapendiente de manera perpendicular una línea recta de 10 metros de

distancia, formándose un triángulo equilátero y en cuyos vértices se tomó la muestra. Las segundas fueron denominadas simples internas (SI) y fueron tomadas ubicando 4 sitios de muestreo en cada esquina de la cuadrícula y uno en el centro de ésta, obteniendo 5 puntos en total. El tercer tipo de muestras fueron las muestras compuestas (CO) que fueron formadas tomando una porción de un kg en los sitios de intersección de las 6 líneas verticales y 6 horizontales de la cuadrícula (nodos), mezclando y dividiendo las 36 porciones por cuarteos hasta tener aproximadamente un kg de material. (Mendoza y Espinosa, 2017). (Figura 2).

Las muestras fueron tomadas con la ayuda de una pala recta y una pala cuchara con las que se cavó un pozo de forma cuadrada 30x30x30 cm, tomándose en uno de los lados de cada pozo, una rebanada de grosor homogéneo desde la superficie del suelo hasta los 30 cm de profundidad.

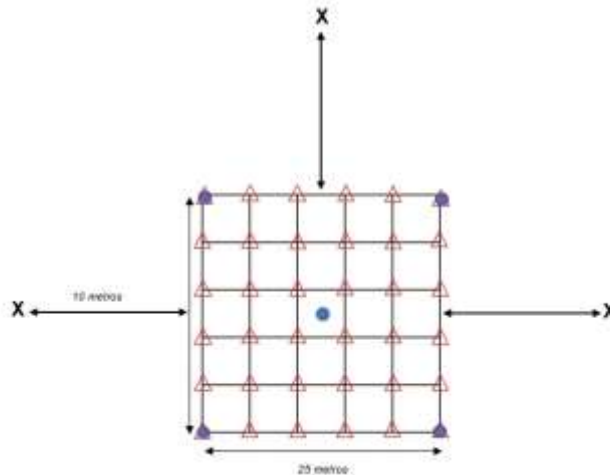


Figura 2. Ubicación de los puntos de muestreo tomando como referencia el conglomerado. Las muestras SE están marcados con una “X”, las SI con un círculo y las submuestras para formar la compuesta con un triángulo.

Las muestras se analizaron en el laboratorio de análisis físicos y químicos del Departamento de Suelos en la Universidad Autónoma Chapingo, se determinaron 12 propiedades físicas y 18 propiedades químicas, que se enlistan en el Cuadro 8.

Las propiedades físicas determinadas para cada muestra de suelo fueron: densidad aparente (DA) por el método del terrón parafinado (Blake, 1965);

densidad real (DR) 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 (SA) por el método de Yoder con un tamiz de abertura 0.25 mm (Amézqueta, 1999); humedad aprovechable (HA) como la diferencia entre CC y PMP (Brady & Weil, 1999); y porosidad total (f) utilizando la DA y la DR (Brady & Weil, 1999).

Para las propiedades químicas se evaluaron siguiendo los métodos que se mencionan a continuación: el pH se determinó 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) y materia orgánica (MO) mediante el procedimiento de Walkley & Black (van Reeuwijk, 2003); nitrógeno total (Nt) y nitrógeno inorgánico ($\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$) siguiendo la NOM-021-RECNAT-2002; 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), zinc (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).

Cuadro 8. Propiedades determinadas en las muestras de suelo colectadas.

Propiedades físicas	Propiedades químicas
Capacidad de campo (CC, %)	Capacidad de intercambio catiónico (CIC, $\text{Cmol}_{(+)}\text{Kg}^{-1}$)
Punto de marchitez permanente (PMP, %)	pH
Humedad aprovechable (HA, %)	Materia orgánica (MO, %)
Densidad aparente (DA, gr/cm^3)	Carbono (C, %)

Densidad real (DR, gr/cm ³)	Amonio (NH ₄ ⁺ , mg/kg)
Porosidad total (f, %)	Nitrato (NO ₃ ⁻ , mg/kg)
Microporosidad (mf, %)	Nitrógeno total (Nt, %)
Macroporosidad (Mf, %)	Nitrógeno total (Nt, mg/kg)
Estabilidad de agregados (SA, %)	Nitrógeno mineral (N _{min} , mg/kg)
Arcilla (%)	Nitrógeno orgánico (N _{org} , mg/kg)
Limo (%)	Fosforo (P, mg/kg)
Arena (%)	Potasio (K, mg/kg)
	Calcio (Ca, mg/kg)
	Magnesio (Mg, mg/kg)
	Hierro (Fe, mg/kg)
	Cobre (Cu, mg/kg)
	Zinc (Zn, mg/kg)
	Manganeso (Mn, mg/kg)
	Boro (B, mg/kg)

Una vez obtenidos los resultados de las pruebas de laboratorio para cada una de las muestras, se realizó un análisis estadístico para encontrar diferencias significativas entre los métodos usados para el muestreo, este análisis se realizó por sistema. Para tener un número igual de muestras simples externas, simples internas y compuestas, se promediaron los valores de las muestras simples externas e internas por conglomerado, esto con la finalidad de facilitar el procedimiento de cálculo. Para el análisis estadístico se utilizó el software SAS 9.4, la primera prueba aplicada fue un análisis de varianza (ANVA) con un Alpha ≤ 0.05 , posteriormente, para corroborar los resultados se aplicó una prueba de comparación de medias de Tukey con $p \leq 0.05$. Para conocer cuál de los tres métodos de muestreo empleados fue el más preciso en la determinación del valor de las variables evaluadas, se realizó un análisis utilizando el coeficiente de variación (CV) para comparar los métodos en cada sistema, la condición para determinar la precisión fue aquel que presentara el menor valor del CV. En el caso de que no existiera regularidad se contó el número de variables con menor CV para cada método de muestreo.

3.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.4.1. Propiedades Físicas

En el sistema Loma de Enmedio (LE), el ANVA mostró que para las propiedades físicas no se encontraron diferencias estadísticamente significativas debidas a la utilización de los diferentes métodos de muestreo, sin embargo, la prueba de Tukey mostró una diferencia de medias para el punto de marchitez permanente (PMP) donde el valor mayor fue para el muestreo SE, seguido del muestreo SI y en tercer lugar el muestreo CO. Lo anterior estableció un orden de comportamiento para el valor de esta variable que fue $SE>SI>CO$. El orden anterior se dio también para las variables CC, mf, % de arcilla y % de limo, independientemente de la significancia. El orden inverso, es decir, $CO>SI>SE$ fue para las variables Mf, EA y % de arena. El otro orden encontrado fue $SI>SE>CO$ y las variables que lo cumplieron fueron HAY f. Los órdenes con menor número de variables fueron $SE<CO<SI$ que sólo lo cumplió la DR y el orden $CO>SE>SI$ para la DA. Por lo anterior se puede afirmar que no se presentó una regularidad para todas las variables en cuanto al efecto del método de muestreo en la obtención de los valores medios. Sin embargo, el orden $SE>SI>CO$ fue el predominante al afectar a 5 de las 12 variables físicas.

En el sistema Santa María (SM), que es una plantación forestal comercial maderable, al realizar las mismas pruebas estadísticas que en el sistema LE, se presentó una sola variable con diferencias estadísticamente significativas debidas al método de muestreo, este fue la EA, el valor mayor de esta variable lo presentó el muestreo CO, seguido del SI y por último el SE, quedando un orden de magnitud $CO>SI>SE$, este mismo caso sucedió con la CC, HA y f. Otro orden encontrado fue $SI>SE>CO$, esta condición se observó para las variables PMP, Mf y % de arena. El orden de tipos de muestreo $CO>SE>SI$ se encontró en la mf, % de Arcilla y % de Limo. El orden $SE>CO>SI$ se presentó para la DR. Por último, el orden $SE>SI>CO$ fue para la DA. En este caso, el orden que predominó para las propiedades físicas en el sistema SM fue, $CO>SI>SE$ afectando a cuatro variables de las 12 evaluadas, las ordenes $SE>CO>SI$ y $SE>SI>CO$ fueron los menos predominantes ya que cada uno de ellos solo afectó a una propiedad. Lo

anterior muestra que tampoco se presentó un patrón regular en el comportamiento del valor de las variables que indicaran un efecto del método de muestreo en la obtención de los valores medios.

En el sistema Ocotil (OC), el ANVA aplicado a cada una de las variables para determinar si existían diferencias significativas debidas a los diferentes métodos evaluados no arrojó ninguna diferencia estadísticamente significativa. De igual manera sucedió en la comparación de medias, en ninguno de los tres métodos empleados hubo diferencias importantes. El orden de los valores medios en función del tipo de muestreo fue SE>CO>SI que se dio en la CC, HA y DR. El orden SE>SI>CO lo presentaron el PMP, EA y % de arena. Estos dos órdenes son los que tuvieron mayor significancia ya que cada uno de ellos afecto a tres variables. El segundo grupo importante lo conforman el orden CO>SE>SI encontrado en la DA y mf; y SI>SE>CO presentado en f y Mf. El orden CO>SI>SE solo se localizó en el % de limo. El % de arcilla fue un caso especial ya que los valores medios del muestreo SI y la CO fue igual, el menor valor lo obtuvo el SE. Al igual que en casos anteriores, el orden de valores medios por método de muestreo no presentó ningún patrón regular en las propiedades evaluadas. De lo anterior se puede afirmar que, en cuanto a la determinación de las propiedades físicas, el utilizar el método de muestreo simple o el compuesto, no afectó de manera significativa los valores medios de las variables estudiadas a excepción de la variable PMP y EA en los sistemas LE y SM, respectivamente.

Cuadro 9. Efecto de los métodos de muestreo sobre los valores medios de propiedades físicas.

Variable	Sistema LE			Sistema SM			Sistema OC		
	SE	SI	CO	SE	SI	CO	SE	SI	CO
CC (%)	52.86 _a	52.83 _a	48.33 _a	62.47 _a	62.71 _a	63.69 _a	53.86 _a	50.69 _a	52.08 _a
PMP (%)	32.41 _a	29.97 _{ab}	28.33 _b	35.67 _a	35.82 _a	35.34 _a	30.41 _a	29.75 _a	29.67 _a
HA (%)	20.45 _a	22.85 _a	20.01 _a	26.81 _a	26.89 _a	28.35 _a	23.45 _a	20.95 _a	22.41 _a
DA (gr/cm ³)	0.843 _a	0.827 _a	0.853 _a	0.830 _a	0.827 _a	0.820 _a	0.893 _a	0.887 _a	0.937 _a
DR (gr/cm ³)	2.160 _a	2.197 _a	2.170 _a	2.293 _a	2.280 _a	2.283 _a	2.410 _a	2.400 _a	2.403 _a
f (%)	60.65 _a	62.23 _a	60.11 _a	63.75 _a	63.76 _a	64.05 _a	62.89 _a	63.04 _a	60.92 _a
mf (%)	44.46 _a	43.48 _a	41.17 _a	51.82 _a	51.77 _a	52.20 _a	47.76 _a	44.53 _a	48.78 _a
Mf (%)	16.19 _a	18.75 _a	18.94 _a	11.93 _a	12.00 _a	11.85 _a	15.13 _a	18.50 _a	12.14 _a

Variable	Sistema LE			Sistema SM			Sistema OC		
	SE	SI	CO	SE	SI	CO	SE	SI	CO
EA (%)	67.60 _a	70.47 _a	71.65 _a	61.19 _b	63.84 _{ab}	66.49 _a	72.59 _a	71.94 _a	68.13 _a
Arcilla (%)	4.027 _a	3.917 _a	2.083 _a	4.860 _a	4.083 _a	9.583 _a	9.583 _a	12.917 _a	12.917 _a
Limo (%)	44.30 _a	42.58 _a	39.58 _a	51.25 _a	49.72 _a	62.08 _a	55.14 _a	57.75 _a	61.25 _a
Arena (%)	51.67 _a	53.50 _a	58.33 _a	43.94 _a	46.20 _a	28.33 _a	35.25 _a	29.32 _a	25.83 _a

SE = Simple externo, SI = Simple interno, CO = Compuesto. Valores con la misma letra sobre la hilera no son diferentes estadísticamente (Tukey, $\alpha = 0.05$)

3.4.2. Propiedades químicas

En el sistema Loma de Enmedio (LE), el ANVA mostró que para las propiedades químicas las variables que mostraron diferencias significativas por los métodos de muestreo fueron NH_4^+ , NO_3^- , N_{min} y B en las restantes no se encontraron diferencias importantes. Lo anterior puede deberse a que estas formas de N son las que presentan altos coeficientes de variación por ser las formas más dinámicas dentro del suelo debido a que son las formas aprovechables. Para el NH_4^+ el orden de valores fue $\text{SI} > \text{SE} > \text{CO}$, las otras variables que presentaron este mismo orden fueron NO_3^- , N_{min} , P y Zn. Otro orden encontrado fue $\text{CO} > \text{SI} > \text{SE}$ para las variables pH, MO, C, Nt, N_{org} , y K. Para el orden $\text{SI} > \text{CO} > \text{SE}$ las variables fueron Fe, Cu, Mn y B. El orden $\text{SE} > \text{CO} > \text{SI}$ fue para la variable CIC y Ca, el orden $\text{CO} > \text{SE} > \text{SI}$ solo se encontró para Mg. Por lo anterior, se puede afirmar que no se presentó una regularidad para todas las variables químicas en cuanto al efecto del método de muestreo en la obtención de los valores medios. Sin embargo, el orden $\text{CO} > \text{SI} > \text{SE}$ fue el predominante al afectar a 7 de las 18 variables químicas. Otro aspecto por resaltar es que la mayoría de los micronutrientes se agruparon en el orden $\text{SI} > \text{CO} > \text{SE}$.

El análisis estadístico aplicado a las propiedades químicas del sistema SM, para determinar el efecto de los diferentes métodos sobre su valor medio, dio como resultado 5 propiedades con diferencias estadísticamente significativas, estos fueron: NH_4^+ , NO_3^- , Nt, N_{min} y N_{org} . El primer orden que se encontró en los tipos de muestreo fue $\text{SI} > \text{SE} > \text{CO}$, y fue para el NH_4^+ , pH, Nt, N_{org} y Ca. Otro orden importante encontrado fue $\text{SE} > \text{SI} > \text{CO}$, esta condición lo cumplen las variables

CIC, NO_3^- , N_{min} , Cu, Zn y B. El siguiente orden de muestra fue CO>SI>SE, que lo cumplieron las variables MO, C y Fe. El orden CO>SE>SI solo fue para el K, el SI>CO>SE únicamente para Mg, el SE>CO>SI para Mn y SI>CO=SE para el P. Como puede observarse, al igual que en casos anteriores, no se encontró una regularidad en el comportamiento de los valores medios de las variables debido a los diferentes métodos de muestreo. El orden que predominó fue SE>SI>CO, afectando a 6 variables de las 18 variables evaluadas.

El análisis estadístico en el sistema OC, arrojó como resultado 6 propiedades con diferencias estadísticamente significativas, estos fueron: CIC, NH_4^+ , NO_3^- , N_{min} , K y B. La CIC, no presentó un *p-valor* significativo (<0.05), sin embargo, la comparación de medias indicó que hay diferencias importantes entre los métodos usados para esta variable, el orden de los valores medios fue CO>SE>SI, esta misma condición lo presentaron el NO_3^- , P y Mg. El orden SE>CO>SI se dio en cuatro variables, estos fueron el pH, NH_4^+ , N_{min} y Ca. El orden SE>SI>CO tuvo efecto en 5 propiedades, estas fueron el Nt, N_{org} , Fe, Zn y B. Otro orden encontrado fue SI>SE>CO, cuya influencia se presentó en la MO y C. El orden SI>CO>SE, se presentó en el Cu y Mn. Por último, el orden CO>SI>SE solo afectó al K. En esta evaluación tampoco se presentó un patrón de regularidad que nos indique un orden de los valores medios obtenidos a través de tres métodos de muestreo. Cabe mencionar que, el orden SE>SI>CO, fue el que presentó una mayor influencia en las variables evaluadas, ya que afectó a 5 de las 18 estudiadas.

De lo anterior se puede afirmar que en cuanto a la determinación de las propiedades químicas el utilizar el método de muestreo, simple o el compuesto afectó de manera significativa los valores medios de las variables NH_4^+ , NO_3^- y N_{min} en los tres sistemas estudiados. Además del B en el sistema LE, Nt y N_{org} en el sistema SM y CIC, K y B en el sistema OC.

Cuadro 10. Efecto de los métodos de muestreo sobre los valores medios de propiedades químicas.

Variable	Sistema LE			Sistema SM			Sistema OC		
	SE	SI	CO	SE	SI	CO	SE	SI	CO
CIC (Cmol (+) Kg ⁻¹)	46.11 _a	40.33 _a	41.17 _a	59.79 _a	57.35 _a	54.90 _a	56.41 _{ab}	54.01 _b	63.10 _a
pH	5.39 _a	5.42 _a	5.44 _a	6.08 _a	6.16 _a	5.97 _a	6.12 _a	5.92 _a	5.96 _a
MO (%)	10.41 _a	10.50 _a	11.00 _a	6.97 _a	7.95 _a	9.64 _a	7.35 _a	7.46 _a	7.33 _a
C (%)	6.04 _a	6.09 _a	6.38 _a	4.04 _a	4.61 _a	5.59 _a	4.26 _a	4.33 _a	4.25 _a
NH ₄ ⁺ (mg/kg)	22.24 _{ab}	27.31 _a	17.47 _b	26.30 _{ab}	27.30 _a	19.73 _b	26.29 _a	20.03 _b	22.77 _b
NO ₃ (mg/kg)	5.31 _a	7.29 _a	3.07 _b	14.42 _a	7.74 _b	2.30 _c	5.82 _{ab}	4.87 _b	7.57 _a
Nt (%)	0.21 _a	0.22 _a	0.22 _a	0.17 _{ab}	0.21 _a	0.16 _b	0.19 _a	0.13 _a	0.12 _a
Nt (mg/kg)	2100 _a	2180 _a	2200 _a	1656 _b	2140 _a	1567 _b	1933 _a	1347 _a	1200 _a
N _{min} (mg/kg)	27.56 _{ab}	34.60 _a	20.53 _b	40.72 _a	35.04 _a	22.03 _b	32.11 _a	24.89 _b	30.33 _a
N _{org} (mg/kg)	2072 _a	2145 _a	2180 _a	1615 _b	2105 _a	1545 _b	1901 _a	1322 _a	1170 _a
P (mg/kg)	1.52 _a	1.76 _a	1.04 _a	1.00 _a	1.42 _a	1.00 _a	1.95 _a	1.30 _a	2.07 _a
K (mg/kg)	255.6 _a	261.5 _a	290.0 _a	551.8 _a	509.3 _a	586.7 _a	618.2 _b	785.6 _{ab}	924.7 _a
Ca (mg/kg)	1008 _a	931 _a	971 _a	1588 _a	1646 _a	1552 _a	1647 _a	1479 _a	1561 _a
Mg (mg/kg)	93.2 _a	91.9 _a	102.0 _a	180.2 _a	189.5 _a	185.7 _a	260.1 _a	256.2 _a	283.7 _a
Fe (mg/kg)	72.98 _a	78.73 _a	73.59 _a	36.10 _a	38.27 _a	40.69 _a	39.41 _a	37.16 _a	35.69 _a
Cu (mg/kg)	0.437 _a	0.610 _a	0.453 _a	0.540 _a	0.503 _a	0.497 _a	0.817 _a	0.943 _a	0.873 _a
Zn (mg/kg)	1.087 _a	1.487 _a	1.063 _a	0.357 _a	0.320 _a	0.207 _a	0.580 _a	0.533 _a	0.433 _a
Mn (mg/kg)	7.24 _a	9.07 _a	8.76 _a	10.12 _a	9.89 _a	10.12 _a	10.96 _a	13.68 _a	11.36 _a
B (mg/kg)	0.617 _b	1.237 _a	0.760 _b	0.830 _a	0.677 _a	0.380 _a	0.500 _a	0.240 _b	0.193 _b

SE = Simple externo, SI = Simple interno, CO = Compuesto. Valores con la misma letra sobre la hilera no son diferentes estadísticamente (Tukey, $\alpha = 0.05$)

3.4.3. Coeficiente de variación de propiedades físicas

Al comparar los CV por variable para los tres métodos de muestreo, en el Cuadro 11 se observa que en el sistema LE, el método de muestreo con mayor número de variables con CV bajo fue el SE, que afectó a 5 variables que fueron: CC, PMP, f, Mf, y % de arcilla. El muestreo CO obtuvo el segundo lugar, afectando a 4 variables, estos fueron: HA, DA, mf y % de arena.

En el sistema SM, el método de muestreo con mayor número de variables con CV bajo fue el muestreo CO, éste afectó a 6 variables que fueron la CC, HA, DA, f, mf y % de limo. Los métodos de muestreo SI y SE solo tuvieron 3 variables cada uno, estas fueron la Mf, % de arcilla y % de arena para el primero y PMP, DR y EA para el segundo, respectivamente.

Para el sistema OC, el método de muestreo CO fue el que tuvo el mayor número de variables con CV bajo afectando a 5 que fueron PMP, DA, f, EA y % de limo. El segundo lugar con 4 variables lo tuvo el método de muestreo SI, estos fueron DR, Mf, % de arcilla y % de arena. Por último, el muestreo SE tuvo tres variables con CV bajos, estos fueron: CC, HA y mf.

Como puede observarse, en ninguno de los sistemas hubo un orden regular que permita definir con certeza la eficiencia de algún método en específico, sin embargo, en el sistema SM y OC la muestra CO fue el que tuvo el mayor número de variables con los CV más bajos, por lo anterior, este método fue el más preciso en cuanto a la determinación de propiedades físicas.

Cuadro 11. Coeficiente de variación de las propiedades físicas en cada sistema con los métodos de muestreo.

Variable	Sistema LE			Sistema SM			Sistema OC		
	SI	SE	CO	SI	SE	CO	SI	SE	CO
CC (%)	12.57	11.73	11.97	9.07	6.21	5.66	14.12	3.37	11.55
PMP (%)	6.07	5.56	7.35	3.67	2.43	3.17	9.37	13.02	8.35
HA (%)	26.66	25.36	23.12	16.26	16.16	14.44	27.83	19.75	21.46
DA (gr/cm ³)	4.09	4.45	2.63	1.93	0.71	0.00	7.45	5.37	2.84
DR (gr/cm ³)	4.79	5.12	15.44	1.90	1.16	1.64	1.51	4.17	4.48
f (%)	5.91	2.12	9.95	2.10	0.94	0.93	4.29	5.15	1.87
mf (%)	11.36	11.99	10.90	7.47	6.86	5.66	9.73	6.75	10.14
Mf (%)	35.65	21.18	27.03	21.65	34.33	29.90	32.94	33.79	34.04
EA (%)	1.31	4.17	5.93	3.81	2.34	2.90	6.39	10.12	6.13
R (%)	72.66	51.59	69.28	26.19	55.22	54.30	8.70	54.38	22.35
L (%)	14.61	18.05	15.89	10.15	17.27	8.38	7.14	9.83	7.07
A (%)	17.96	17.81	13.09	14.69	23.39	36.74	9.54	42.75	27.94

SE = Simple externo, SI = Simple interno, CO = Compuesto.

3.4.4. Coeficiente de variación de propiedades químicas

En el Cuadro 12 se observa que en el sistema LE el método de muestreo SI fue el que obtuvo el mayor número de variables (7 propiedades) con CV bajos, estas fueron: pH, MO, C, P, K, Ca y Zn. El segundo método con mayor número de variables con CV bajos fue SE, estos fueron: CIC, NH₄⁺, NO₃⁻, N_{min}, Mg y Cu.

Para el CO se obtuvieron 5 propiedades con CV bajos, estos fueron: Nt, N_{org}, Fe, Mn y B.

Para el sistema SM, el método SI obtuvo el mayor número de variables (8 propiedades) con CV bajos, que fueron: pH, MO, C, NH₄⁺, N_{min}, P, Zn y B Para los métodos SE y CO solo tuvieron 5 variables cada uno, estos fueron CIC, Nt, N_{org}, Cu y Mn para el primero y NO₃⁻, K, Ca, Mg y Fe para el segundo, respectivamente.

Por último, en el sistema OC con el método de muestreo SE tuvo el mayor número de variables con CV bajos, en ella se encontraron 9 de 18, estos incluyen a la MO; C, Nt, N_{org}, P, Cu, Zn, Mn y B. Le sigue el método de muestreo CO con 5 variables, éstas fueron CIC, K, Ca, Mg y Fe. Por último, con 4 variables se ubicó el muestreo SI, con pH, NH₄⁺, NO₃⁻ y N_{min}.

Del análisis anterior se puede afirmar que los métodos de muestreo SE y SI son los que presentaron menores CV en la mayoría de las variables determinadas, esto da evidencias que, para la valoración de propiedades químicas en suelos forestales, requieren de muestras que no estén contaminadas y/o manipuladas de manera excesiva, tal es el caso de las muestras compuestas que, para su formación, requieren ser mezcladas con varias submuestras que pueden llegar a dar valores menos precisos.

Cuadro 12. Coeficiente de variación de las propiedades químicas en cada sistema con los métodos de muestreo.

Variable	Sistema LE			Sistema SM			Sistema OC		
	SI	SE	CO	SI	SE	CO	SI	SE	CO
CIC (Cmol(+) Kg ⁻¹)	19.08	12.04	14.05	8.51	2.59	28.71	10.16	8.46	3.57
pH	4.74	5.70	6.37	1.29	2.22	1.52	2.93	5.06	4.71
MO (%)	18.21	37.07	37.63	2.64	7.94	25.47	26.28	11.79	12.66
C (%)	18.21	37.07	37.63	2.64	7.94	25.47	26.28	11.79	12.66
NH ₄ ⁺ (mg/kg)	10.37	9.30	19.80	8.34	14.78	17.80	1.72	3.86	9.88
NO ₃ ⁻ (mg/kg)	14.12	10.86	43.30	5.20	5.82	0.00	7.27	14.44	17.55
Nt (%)	29.14	41.33	27.27	13.41	1.62	22.42	18.65	18.57	58.33
Nt (mg/kg)	29.14	41.33	27.27	13.41	1.62	22.42	18.65	18.57	58.33
N _{min} (mg/kg)	10.33	9.22	22.16	5.72	12.52	15.95	1.41	4.63	8.66
N _{org} (mg/kg)	29.49	42.12	27.63	13.60	1.73	22.83	18.98	18.87	59.93

Variable	Sistema LE			Sistema SM			Sistema OC		
	SI	SE	CO	SI	SE	CO	SI	SE	CO
P (mg/kg)	18.11	21.57	85.35	10.35	52.17	70.15	57.09	4.12	30.55
K (mg/kg)	35.79	57.12	52.52	8.67	18.07	2.56	15.36	19.73	10.82
Ca (mg/kg)	20.32	36.69	20.87	7.34	8.83	4.21	26.11	31.19	17.74
Mg (mg/kg)	52.47	40.85	41.61	15.60	16.20	2.55	26.09	24.77	15.96
Fe (mg/kg)	11.40	11.12	9.50	10.73	10.27	6.06	29.13	7.24	2.06
Cu (mg/kg)	23.74	6.55	26.13	13.79	13.27	57.10	23.64	22.11	22.15
Zn (mg/kg)	36.62	65.29	70.10	16.41	21.00	114.64	107.66	34.03	35.33
Mn (mg/kg)	16.12	26.86	14.81	14.40	6.71	26.92	26.70	20.08	27.24
B (mg/kg)	14.29	13.37	10.77	12.33	53.13	47.88	22.28	8.78	19.58

SE = Simple externo, SI = Simple interno, CO = Compuesto.

3.5. CONCLUSIONES

El utilizar métodos de muestreo diferentes impactó más a las variables químicas en comparación de las físicas. En los tres sistemas bajo estudio se pudo observar que para el N fue donde se encontraron diferencias significativas por los métodos de muestreo, principalmente en sus formas de NH_4^+ y el NO_3^- . En el sistema OC existieron otras variables que tuvieron diferencias significativas debidas al método de muestreo, éstas fueron la CIC, el K y B, este último también fue significativamente diferente en el sistema LE. Para las variables físicas el mejor método de muestreo fue el compuesto (CO) y para las variables químicas fue el simple.

3.6. REFERENCIAS

- Amézketa, E. (1999). Soil Aggregate Stability: A Review. *Journal of Sustainable Agriculture*, 14(2–3), 83–151. https://doi.org/10.1300/J064v14n02_08.
- 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>.
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (1999). *The Nature and Properties of Soils* (12th ed.; P. Education, Ed.). New Jersey, USA.
- Carretero, R., P.A. Marasas, E. Souza y A. Rocha, A. (2016). Conceptos de utilidad para lograr un correcto muestreo de suelos. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*. 21:1-11.
- CONAGUA-SMN. (2015). Normales climatológicas por estación. Ciudad de México: Servicio Meteorológico Nacional, CONAGUA. (accessed 15 March 2019).
- Gee, G. W., & Bauder, J. W. (1986). Particle-size Analysis. In A. Klute (Ed.), *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogy methods* (pp. 383–411). <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c15>
- Gutiérrez, F.L. (1997). Evaluación de la calidad del dato analítico. *Diagnostico químico de la fertilidad de suelos. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Medellín*. I. pp. 63-72.
- Lizcano, R., & Olivera, D. (2017). (PDF) Muestreo de Suelos, Técnicas de Laboratorio e Interpretación de Análisis de Suelos. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/323823646_Muestreo_de_Suelos_Tecnicas_de_Laboratorio_e_Interpretacion_de_Analisis_de_Suelos
- Mendoza, R., & Espinoza, A. (2017). Guía Técnica para muestreo de suelos. Asa, 13–21. Retrieved from <https://core.ac.uk/download/pdf/151729876.pdf> <http://repositorio.una.edu.ni/3613/1/P33M539.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.
- Roberts, T. L. y Henry J. L. (2001). El muestreo de suelos: Los beneficios de un buen trabajo. Potash and Phosphate Institute, *Información Agronómica* No.

- 42 Department of Soil Science, University of Saskatchewan. Canada. pp 8.
- Ruíz, O. (1997). Evaluación de la calidad del dato analítico. Diagnostico químico de la fertilidad de suelos. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Medellín. I. pp. 73-84.
- Swenson, L.J., W.C. Dahnke, and D.D. Patterson. (1984). Sampling for soil testing. North Dakota State University, Dept. of Soil Sci., Res. Report No. 8.
- 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.
- Webster, R. (2008). Regression and functional relations. *European Journal of Soil Science*, 48(3), 557–566. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1997.tb00222>

4. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS EN SUELOS DE BOSQUE TEMPLADO CON COBERTURA NATURAL Y PLANTACIONES FORESTALES

4.1. RESUMEN/ABSTRACT

La intervención antrópica en suelos forestales altera sus propiedades físicas y químicas, detectar los posibles cambios es importante. El objetivo de este estudio fue determinar estos cambios en dos sistemas forestales comerciales, a través de la medición de sus propiedades físicas y químicas y comparar éstas con las de un suelo con bosque natural. Se seleccionaron tres sistemas forestales: bosque natural (LE) en Andosol, plantación forestal maderable (SM) y árboles de navidad (OC) en un Luvisol. Se evaluaron 12 propiedades físicas y 18 químicas en 45 muestras simples tomadas una profundidad de 0-30 cm generándose 1350 datos. Se aplicó un análisis de varianza (ANVA) y una prueba de Tukey con $p \leq 0.05$. Los resultados mostraron que el ANVA encontró diferencias significativas entre los sistemas en CC y PMP para la parte física y CIC, pH, NH_4^+ , NO_3^- , N_{min} , K, Mg, Fe, Cu y B para la parte química. La prueba de Tukey encontró diferencias en propiedades físicas para CC, PMP, DR, mf, arcilla; limo y arena y en químicas para CIC, pH, NH_4^+ , NO_3^- , N_{min} . Se concluye que las propiedades físicas en suelos forestales adyacentes son más estables que las propiedades químicas ante el cambio de cobertura. Para las propiedades físicas el mejor sistema fue la plantación forestal maderable (SM), para las propiedades químicas el mejor sistema fue el bosque natural (LE). Para las propiedades físicas no se detectaron valores críticos en los tres sistemas, para las químicas en el sistema OC las concentraciones de NO_3^- y B si fueron críticas.

Palabras clave: Andosol; bosque de coníferas; fertilidad; Luvisol; muestreo; suelo forestal.

PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES IN TEMPERATE FOREST SOILS WITH NATURAL COVER AND FOREST PLANTATIONS

Anthropic intervention in forest soils alters their physical and chemical properties, detecting possible changes is important. The objective of this study was to determine these changes in two commercial forest systems, by measuring their physical and chemical properties and comparing these with those of a soil with natural forest. Three forest systems were selected: natural forest (LE) in Andosol, timber forest plantation (SM) and Christmas trees (OC) in a Luvisol. 12 physical and 18 chemical properties were evaluated in 45 simple samples taken at a depth of 0-30 cm, generating 1350 data. An analysis of variance (ANVA) and a Tukey test with $p \leq 0.05$ were applied. The results showed that ANVA founds significant differences between the systems in SC and PWP for the physical part and CEC, pH, NH_4^+ , NO_3^- , N_{min} , K, Mg, Fe, Cu, B for the chemical part. The Tukey's test founds differences in physical properties for SC, PWP, DR, mf, clay; silt and sand and in chemistries for CEC, pH, NH_4^+ , NO_3^- , N_{min} . It is concluded that the physical properties in adjacent forest soils are more stable than the chemical properties before the change in coverage. For physical properties the best system was the timber forest plantation (SM), for chemical properties the best system was the natural forest (LE). For the physical properties, no critical values were detected in the three systems, for the chemical ones in the OC system, the concentrations of NO_3^- and B were critical.

Keywords: Andosol; conifer forest; fertility; forest soil; Luvisol; sampling.

4.2. INTRODUCCIÓN

El cambio de uso del suelo (CUS) y la implementación de prácticas agronómicas mal aplicadas es uno de los principales causantes de la degradación del suelo (Tan & Lal, 2005). Las propiedades del suelo sensibles a las prácticas de manejo podrían usarse como indicadores y contribuir a su diagnóstico. Por lo tanto, podrían apoyar para una mejor toma de decisiones con respecto a qué técnicas deberían implementarse para desarrollar un sistema productivo basado en un

manejo sostenible y socialmente viable (Duval, Galantini, Iglesias, & Krüger, 2013).

Se ha estudiado mucho acerca de los cambios en las propiedades físicas y químicas que se producen por el cambio de los usos de suelos forestales con cobertura natural (bosques y selvas) a sistemas agrícolas. En relación con lo anterior Zaher, Sabir, Benjelloun, & Paul-Igor, (2020) evaluaron el potencial de almacenamiento de carbono en suelos degradados considerando tres tipos de uso de suelo, bosque de cedro natural (*Cedrus atlantica*), bosque de cedro perturbado y área sin vegetación. Los resultados indicaron que la mayor reserva de carbono fue en el bosque de cedro natural con 395.37 mg ha⁻¹. El cambio de uso de bosque natural a área sin vegetación resultó en un deterioro de las propiedades físicas del suelo, esto se vio reflejado en una disminución del porcentaje de estabilidad de agregados en un 36% y un aumento de la densidad aparente en un 57%.

Vázquez, Benito, Espejo, & Teutscherova, (2020) evaluaron las respuestas de las propiedades del suelo al cambio en su uso. Seleccionaron siete usos del suelo: vegetación clímax de alcornoque, bosque de pino, matorral (arbustos), pradera (pastizales), cultivo de olivo, tierras de cultivo anuales con labranza y con labranza cero. Encontraron que los usos a base de árboles (pino y alcornoque) acumularon los mayores contenidos de carbono (C) y nitrógeno (N). Los pastizales y arbustos se encontraron como una alternativa adecuada capaz de aumentar el contenido de C y restaurar la actividad microbiana, en comparación con la labranza y el cultivo de olivo, los dos usos de suelo que mostraron el contenido de C más bajos. Además, se encontró una mayor estabilidad de los agregados en el matorral arbustivo, este hecho podría desempeñar un papel clave en la restauración del suelo.

Alejandro-Martínez, La Cruz-Morales, Palma-López, Megia-Vera, & Palma-Cancino, (2019) realizaron una evaluación de las propiedades físicas y químicas de suelos ácidos de La Sabana de Huimanguillo, Tabasco, México, sujetos a diferentes usos. Consideraron los siguientes sistemas de producción que corresponden a caña de azúcar (*Saccharum* spp.), piña (*Ananas comosus* L.),

yuca (*Manihot esculenta* Crantz), pastizal y acahual. Los resultados obtenidos mostraron que las propiedades físicas de los tratamientos de piña, caña, yuca y pastizal fueron estadísticamente iguales en cuanto a densidad aparente (DA) y diferentes al sitio de acahual, en cuanto a la porosidad del suelo, el acahual fue estadísticamente superior a los demás. Para las propiedades químicas se encontraron diferencias significativas en el contenido de MO siendo el más alto en acahual, de igual manera el pH presentó diferencias altamente significativas entre los usos de suelo ($p < 0.01$), presentando el cultivo de piña el valor más bajo de acidificación en contraste con el cultivo de caña de azúcar que presentó los valores más altos.

Debido a que el cambio de uso de suelo forestal a otros usos, en la mayoría de los casos ha sido perjudicial, en algunas regiones se han implementado cambios menos agresivos, como los sistemas agroforestales. Villagaray Yanqui, (2014) usó tecnología agroforestal para la recuperación de suelos degradados, en menos de un año se logró el objetivo planteado, sin utilizar agroquímicos ni quema de bosques en la eliminación de plantas invasoras; otra alternativa son las plantaciones forestales comerciales, que si bien pueden ser menos agresivas es posible que produzcan algunos cambios al modificar la cobertura vegetal. Musálem, (2006), menciona que las plantaciones forestales comerciales representan una alternativa de protección de aquellas áreas que no son propicias para la agricultura y que se encuentran desprovistas de vegetación y por lo tanto vulnerables a la erosión, además desempeñan un papel importante en la protección de cuencas hidrográficas, sobre todo, reduciendo los azolves a obras hidráulicas, lagos, lagunas y tierras corriente abajo.

El determinar si las diferencias entre los valores de los parámetros físicos y químicos son significativas desde el punto de vista estadístico, dan pautas para un manejo más eficiente de los sistemas al cambiarlos de su estado natural a sistemas donde prevalecen leñosas y no cultivos.

Evaluar las propiedades físicas y químicas de un suelo bajo una cobertura vegetal determinada, permite determinar su calidad y al estudiar el efecto del manejo en la calidad del suelo, muchas propiedades del suelo interactúan y se ven

afectadas, con una gran variabilidad (Jaramillo-Jaramillo, González-Sánchez, & Álvarez-Mejía, 2008; Souza, Marques-Júnior, Pereira, Sánchez-Sáenz, 2009). Por lo tanto, es de suma importancia evaluar las características de manera simultánea y global para comprender cuáles son las más sensibles y cuál es el efecto de los diferentes sistemas en la calidad del suelo dentro de un sitio determinado (Camacho-Tamayo, Luengas, & Leiva, 2010).

Por lo anterior los objetivos de este trabajo fueron determinar si existían diferencias estadísticamente significativas en las propiedades físicas y químicas en un suelo con plantaciones forestales comerciales para aprovechamiento maderable y otro para producción de árboles de navidad y su comparación con un suelo con cobertura de bosque natural y si las diferencias coincidían con las diferencias dadas por las clasificaciones por rangos de valores; además de determinar su estado físico y químico.

4.3. MATERIALES Y MÉTODOS

4.3.1. Área de estudio

El área de estudio se localiza en el núcleo agrario “Bienes comunales de San Gerónimo Zacapexco” ubicado al suroeste del municipio de Villa del Carbón, estado de México, en las coordenadas extremas siguientes: máximas 19° 52' 39" N y 99° 39' 04" O; mínimas 19° 36' 48" N y 99° 22' 21" O. El sitio forma parte de la provincia fisiográfica Eje Neovolcánico, subprovincia Lagos y Volcanes de Anáhuac, el sistema de toposformas es lomerío y sierra (INEGI, 2001a, 2001b, 2001c). Los tipos de rocas presentes son volcanoclástico e ígnea extrusiva básica de la era Cenozoica (INIFAP-CONABIO, 1995). La temperatura oscila entre 22.2 °C y 7.6 °C con una media normal de 14.9 °C. la precipitación media anual es de 1,089 mm (García, 1998; SMN-CNA, 2019). Los suelos dominantes son Luvisoles y Andosoles (INIFAP-CONABIO, 1995). En el Cuadro 13 se muestran las características y la ubicación de los tres sistemas bajo estudio.

Cuadro 13. Datos de los sistemas.

Nombre del predio	Loma de Enmedio (LE)	Santa María (SM)	Ocotal (OC)
Uso de suelo y vegetación	Bosque natural	Plantación maderable	Árboles de navidad
Área (ha)	76	19	3.5
Altitud (msnm)	3,093	2,798	2,730
Latitud N	19° 37'46.14"	19° 39'42.86"	19° 41'13.05"
Longitud W	99° 31'38.53"	99° 29'00.043"	99° 28'11.17"

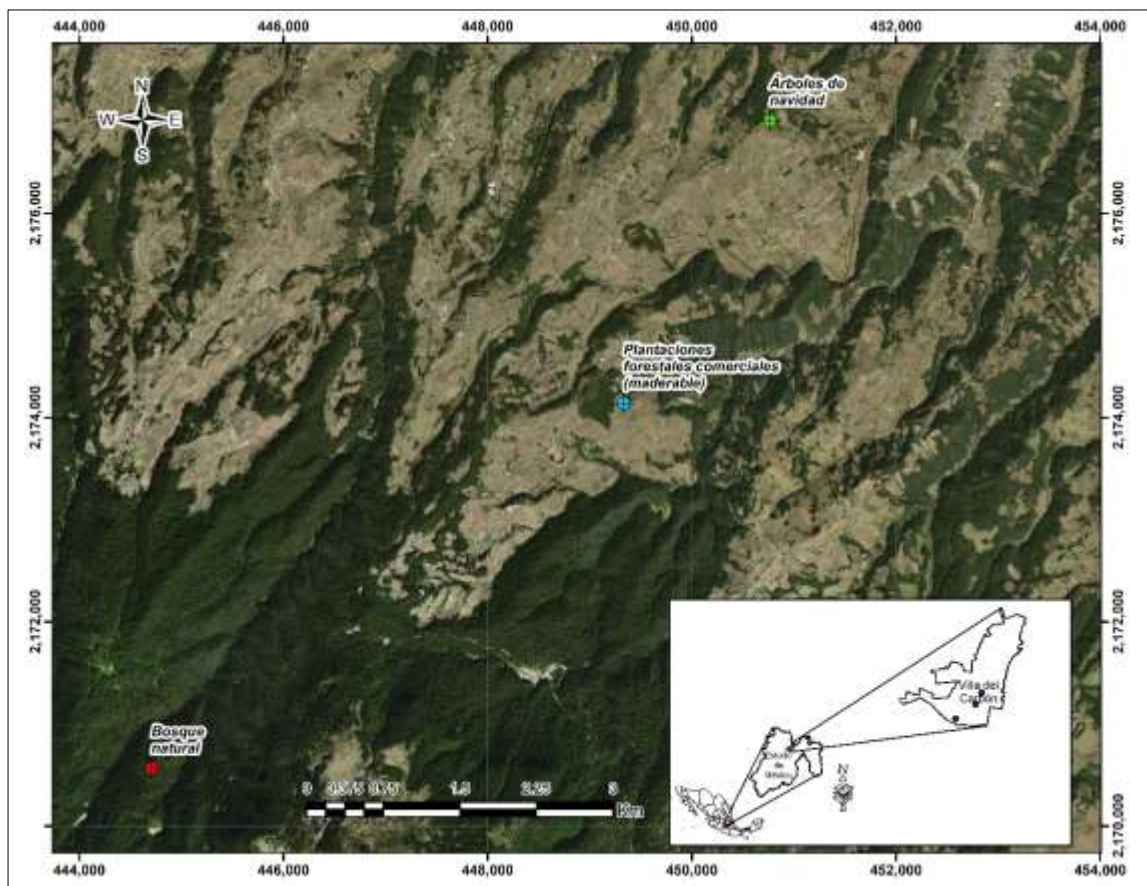


Figura 3. Ubicación de los sistemas en el municipio de Villa del Carbón, México.

4.3.2. Método de muestreo

Se seleccionaron tres sistemas forestales: bosque natural de coníferas denominado Loma de en medio (LE), plantación forestal maderable (*Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham, *Pinus ayacahuite* Ehrenb. ex Schltdl), denominado Santa María (SM) y una plantación de árboles de navidad (*Pseudotsuga menziesii* (MIRB.), *Pinus ayacahuite* Ehrenb. ex Schltdl) con el nombre de Ocotal (OC).

En las plantaciones forestales comerciales (SM y OC) se lleva a cabo un manejo silvícola, y esto implica la introducción de maquinaria y mano de obra para la preparación del sitio, plantación y cosecha, aplicación de plaguicidas y fungicidas para el control de plagas y enfermedades, aplicación de herbicidas para el control de malezas, podas, aclareos, apertura de brechas cortafuego, entre otras actividades.

En cada sistema forestal se eligieron al azar tres áreas de referencia denominadas conglomerados con una dimensión de 25 x 25 m. Para ubicar los puntos de muestreo en el conglomerado se formó una cuadrícula con puntos equidistantes a cada 5 m, teniéndose 36 nodos, para tener homogeneidad al momento de tomar las muestras, se ubicaron 4 sitios de muestreo en cada esquina de la cuadrícula y uno en el centro de ésta, se obtuvieron 5 puntos en total, una vez teniendo los puntos y con la ayuda de una pala recta y una pala cuchara se cavó un pozo de forma cuadrada 30x30x30 cm, tomándose en uno de los lados de cada pozo, una rebanada de 1 kg y de grosor homogéneo desde la superficie del suelo hasta los 30 cm de profundidad que constituyó la muestra de suelo simple (Figura 4). El número de muestras fue de 45 (5 puntos X 3 conglomerados X 3 sistemas).

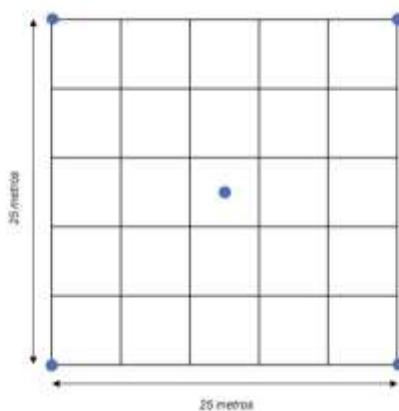


Figura 4. Ubicación de los puntos de muestreo tomando como referencia el conglomerado.

Una vez tomadas las muestras se procedió a colocarlas en bolsas de plástico previamente etiquetadas para su identificación. Estas se secaron al aire libre, sin exponerlas directamente al sol (NOM-021-RECNAT, 2002). Posterior a esto, se trituraron con un mazo de madera y tamizaron en malla de abertura de 2 mm (Hernández, Gutiérrez, Ortiz-Solorio, Sánchez, & Ángeles, 2017). Las determinaciones físicas y químicas (Cuadro 14) se realizaron en los laboratorios del Departamento de Suelos en la Universidad Autónoma Chapingo utilizando las metodologías que se enuncian a continuación.

Propiedades físicas

Densidad aparente (DA) por el método del terrón parafinado (Blake, 1965); densidad real (DR) 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 (Amézketa, 1999); humedad aprovechable (HA) como la diferencia entre CC y PMP (Brady & Weil, 1999); y porosidad total (f) utilizando la DA y la DR (Brady & Weil, 1999).

Propiedades químicas

El pH se determinó 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) y materia orgánica (MO) mediante el procedimiento de Walkley & Black (van Reeuwijk, 2003); nitrógeno total (Nt) y nitrógeno inorgánico ($\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$) siguiendo la NOM-021-RECNAT-2002; fósforo aprovechable (P) 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 cuantificados en espectrofotometría de emisión de flama para K y absorción atómica para Ca y Mg (van Reeuwijk, 2003); hierro (Fe), cobre (Cu), zinc (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); la capacidad de intercambio catiónico (CIC) se determinó mediante el intercambio con acetato de amonio 1N pH 7 (van Reeuwijk, 2003).

Cuadro 14. Propiedades determinadas en las muestras de suelo colectadas.

Propiedades físicas	Propiedades químicas
Capacidad de campo (CC, %)	Capacidad de intercambio catiónico (CIC, $\text{Cmol}_{(+) } \text{Kg}^{-1}$)
Punto de marchitez permanente (PMP, %)	pH
Humedad aprovechable (HA, %)	Materia orgánica (MO, %)
Densidad aparente (DA, gr/cm^3)	Carbono (C, %)
Densidad real (DR, gr/cm^3)	Amonio (NH_4^+ , mg/kg)
Porosidad total (f, %)	Nitrato (NO_3^- , mg/kg)
Microporosidad (mf, %)	Nitrógeno total (Nt, %)
Macroporosidad (Mf, %)	Nitrógeno total (Nt, mg/kg)
Estabilidad de agregados (EA, %)	Nitrógeno mineral (N_{min} , mg/kg)

Propiedades físicas	Propiedades químicas
Arcilla (%)	Nitrógeno orgánico (N _{org} , mg/kg)
Limo (%)	Fosforo (P, mg/kg)
Arena (%)	Potasio (K, mg/kg)
	Calcio (Ca, mg/kg)
	Magnesio (Mg, mg/kg)
	Hierro (Fe, mg/kg)
	Cobre (Cu, mg/kg)
	Zinc (Zn, mg/kg)
	Manganeso (Mn, mg/kg)
	Boro (B, mg/kg)

Se obtuvo un promedio de cada variable por conglomerado obteniéndose tres valores por sistema y posteriormente se realizó un análisis estadístico por medio de un análisis de varianza (ANVA) y una prueba de diferencia de medias de Tukey utilizando el software SAS 9.4 con $p \leq 0.05$.

4.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.4.1. Propiedades Físicas

En el Cuadro 15 se puede observar que se tuvieron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los sistemas para la CC, siendo el sistema con los valores más altos SM, siguiéndole LE y por último el OC esto se debió al porcentaje mayor de microporos que son los poros de retención de agua que como se puede apreciar tuvieron un comportamiento similar, esto concuerda con Meng et al., (2020), quienes hallaron una mayor porosidad en bosques plantados en comparación con bosques naturales. Shao, Ai, Sun, Hou, & Dong, (2020) mencionan que la CC es uno de los factores limitantes de la calidad del suelo en sistemas forestales.

Para el PMP se tuvieron diferencias significativas ($p < 0.05$), el sistema con el valor más alto fue nuevamente SM siguiéndole LE y por último OC, siendo la explicación la misma que en el caso de la CC.

Para HA nuevamente el resultado fue similar a los valores de CC y PMP, aunque para esta variable no hubo diferencias significativas en el ANVA ni en la prueba de Tukey. El valor más alto se ubicó en SM y el más bajo en OC, cabe destacar que la HA es una propiedad considerado como indicador de la calidad del suelo y un valor bajo en esta variable denota un suelo de baja calidad (Shao et al., 2020).

Para DA no hubo diferencias estadísticamente significativas en el p-valor ni en la comparación de medias, los valores más bajos se ubicaron en LE y SM. Castellanos, Uvalle-Bueno, y Aguilar-Santelises, (2000) señalan que una menor DA indican que en el suelo existe un alto contenido de MO, lo que se corroboró en este estudio ya que se cumplió esta afirmación. Shen et al. (2020) mencionan que la DA disminuye conforme aumenta la densidad de la cubierta forestal lo que también se cumplió en esta investigación, ya que la densidad arbórea y altura promedio de los árboles en los sistemas LE y SM son altas, en cambio en OC, aunque existe una densidad mayor, la escasa altura y diámetro que presentan los individuos y el ciclo de corta relativamente corto, dejan al suelo la mayor parte del tiempo descubierto, lo que se refleja en una DA mayor para este sistema.

En el caso de la DR, de igual manera no hubo diferencias significativas en el *p-valor*, sin embargo, la comparación de medias muestra una clara diferencia entre los sistemas, existiendo una similitud entre los sistemas SM con OC y SM con LE, y una diferencia entre LE con OC, el valor mayor se presenta en OC y el menor en LE.

La porosidad total (f) no presentó diferencias significativas en el ANVA ni en la prueba de Tukey. Mientras que la microporosidad (mf) presentó una diferencia en la comparación de medias, siendo el sistema SM quien presentó el valor más alto y LE el valor más bajo y una diferencia mínima con OC, el comportamiento de este parámetro nos indica que el sistema OC tuvo similitud con SM y con LE, y que existe una diferencia entre LE y SM. La macroporosidad (Mf) no presentó

diferencias en el ANVA ni en la comparación de medias, esto concuerda con lo reportado por Meng et al. (2020) donde mencionan que la conversión del uso de suelo del bosque natural a plantaciones forestales, producen un cambio en los poros a nanoescala.

De igual manera, en la estabilidad de agregados (EA) no hubo diferencias significativas en ninguno de los casos, sin embargo, el valor más alto lo obtuvo OC, esto es respaldado por la diferencia que existe en el contenido de arcilla que fue más alto en este sistema, además el resultado es similar a los obtenidos por Dou, Yang, An, & Zhu, (2020), quienes afirman que la EA es más fuerte en sitios con árboles bajos. Un estudio realizado por Kooch, Sanji, & Tabari, (2019) menciona que la EA es significativamente más alto en rodales naturales que en plantaciones forestales, esta afirmación se cumplió parcialmente ya que solo es aplicable para los sistemas LE y SM.

Para la arcilla no hubo un *p-valor* significativo, sin embargo, la comparación de medias indica que hubo una diferencia entre OC con SM y LE, siendo estas últimas similares, el valor más alto lo presentó OC, lo anterior se debe a que los Luvisoles se caracterizan por tener un enriquecimiento de arcilla en el subsuelo, esto explicaría el alto contenido de esta clase textural en el sistema OC ya que se trata de un Luvisol en su estado puro, en cambio, SM es un sistema que se ubica en una transición entre un Andosol y un Luvisol por eso presentó un valor intermedio (Villafuerte & García 2002; INEGI, 2004). Algo similar sucedió con los limos, el *p-valor* no presentó ninguna diferencia, pero la comparación de medias indicó que el sistema SM presentó valores similares con los sistemas LE y OC, pero estos dos últimos mostraron una diferencia clara, teniendo el valor más alto OC y por ende el más bajo lo presentó LE. En el caso de las arenas, el ANVA no detectó diferencias significativas, pero si la prueba de Tukey, el valor más alto se presentó en LE y el más bajo en OC. Lo anterior es lógico debido a que son los sitios que se encuentran a mayor distancia uno de otro y además la transición que dio lugar a un diferente tipo de suelo.

De acuerdo con los valores obtenidos para CC, PMP y HA el orden fue SM>LE>OC. En el caso de DA el orden fue OC>SM=LE. Para DR, % de arcilla y

limo el orden fue OC>SM>LE. Para f y mf el orden fue SM>OC>LE. Para Mf y EA el orden fue e OC>LE>SM. Por último, para el % de arena el orden fue LE>SM>OC. Considerando que para la mayoría de las variables físicas es importante que se tenga un valor alto y sólo en el caso de la DA un valor bajo, el mejor sistema desde el punto de vista físico fue SM con 6 valores más convenientes, seguido de OC con 4, y LE con 2. De lo anterior se puede concluir que los suelos Andosoles con cobertura natural en comparación con suelos Luvisoles con cobertura forestal comercial presentan características físicas menos favorables.

Los suelos Luvisoles de SM y OC solo presentaron diferencias significativas en CC, PMP y el % de arcilla manteniéndose con la misma capacidad en propiedades físicas fundamentales del suelo como son la capacidad de infiltrar (Mf, f), retener (mf) y almacenar agua (HA). En cuanto a la comparación de los suelos de plantaciones forestales comerciales (Luvisol) con bosque natural (Andosol). El sistema OC fue más diferente a este en las propiedades de DR, % de limo, arcilla y arena. El sistema SM fue más diferente en las propiedades físicas CC, PMP y mf. Las diferencias significativas encontradas siempre favorecieron a los suelos bajo plantaciones forestales comerciales. Estas diferencias pudieran estar más relacionadas con los diferentes porcentajes de arcilla, limo y arena mostrados en el Cuadro 15 donde para las tres fracciones se encontraron diferencias significativas. Por otra parte, la textura de los suelos fue franco arenosa, entre franco arenosa y franco limosa y franco limosa, para los sistemas LE, SM y OC respectivamente, esto es importante desde el punto de vista de su génesis. pues suelos con texturas semejantes provienen de un mismo material parental (Kassa, Dondeyne, Poesen, Frankl, & Nyssen, 2017). Lo anterior reafirma que el suelo del sistema SM tiene propiedades intermedias entre el suelo con cobertura natural (Andosol) sistema LE y el suelo Luvisol del sistema OC.

Cuadro 15. *p*-valor y valores medios obtenidos en el análisis estadístico para propiedades físicas.

Variable	Valores medios / sistema			<i>p</i> -valor
	LE	SM	OC	
CC (%)	52.83 _b	62.71 _a	50.69 _b	0.031
PMP (%)	29.97 _b	35.82 _a	29.75 _b	0.040
HA (%)	22.85 _a	26.89 _a	20.95 _a	0.367
DA (gr/cm ³)	0.83 _a	0.83 _a	0.89 _a	0.141
DR (gr/cm ³)	2.20 _b	2.28 _{ba}	2.40 _a	0.081
f (%)	62.23 _a	63.76 _a	63.04 _a	0.677
mf (%)	43.48 _b	51.77 _a	44.53 _{ba}	0.088
Mf (%)	18.75 _a	12.00 _a	18.50 _a	0.239
EA (%)	70.47 _a	63.84 _a	71.94 _a	0.152
Arcilla (%)	3.92 _b	4.08 _b	12.92 _a	0.076
Limo (%)	42.58 _b	49.72 _{ba}	57.75 _a	0.117
Arena (%)	53.50 _a	46.20 _{ba}	29.32 _b	0.086

PMP=Punto de marchitez permanente, HA=Humedad aprovechable, DA=Densidad aparente, DR=Densidad real, f=porosidad total, mf=microporosidad, Mf=Macroporosidad, EA=Estabilidad de agregados.

4.4.2. Propiedades Químicas

Como se puede observar en el Cuadro 16, para la CIC se tuvieron diferencias altamente significativas ($p < 0.001$), siendo el sistema con el valor más alto OC seguido de SM y por último LE. Los resultados anteriores concuerdan de manera parcial con lo manifestado por (Pérez, Escolástico; Masaguer; Vargas, & Moliner, 2014) quien afirma que la fuente de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo es la MO y las arcillas, ya que en los resultados de los análisis físicos (Cuadro 15), muestran que el sistema OC tuvo el valor más alto (12.92 % de arcilla) en comparación con los sistemas SM (4.08 %) y LE (3.92 %) entre los que no se tuvieron diferencias significativas. Los valores medios de CIC no tuvieron relación con los valores medios de la MO, además los valores medios de la MO

no fueron estadísticamente diferentes, aunque el contenido fue mayor para el sistema LE sin impactar el valor de la CIC que fue el más bajo. Por lo anterior se cumplió parcialmente la afirmación de Essington, (2015), quien afirma que la CIC tiene relación con el pH, la MO y los contenidos de arcilla. En esta investigación la variable que explica el comportamiento de la CIC en los sistemas es el contenido de arcilla, pues el comportamiento menor de la CIC en el sistema LE se dio debido a que se encontraron los valores más bajos de arcilla.

Para la variable pH también se obtuvieron diferencias significativas ($p < 0.05$), teniendo el mayor valor el suelo del sistema SM seguido de OC y por último LE, la diferencia significativa fue entre los sistemas LE y SM, en los tres casos los suelos presentaron pH ácido, pero con un valor menor en LE debido a un mayor contenido de arena y por tanto una mayor lixiviación de bases, así como una mayor concentración de MO (Shen et al., 2020).

Para la MO, no hubo diferencias significativas, aunque el valor mayor fue para el sistema LE seguido de SM y por último OC, este resultado está en función de la cobertura arbórea que presenta cada sistema, ya que los contenidos de MO en los suelos forestales varían de acuerdo con la cobertura vegetal y a la cantidad de aportes de residuos que este aporta al suelo (Salgado-García et al., 2010). Debido a que en el sistema natural se tuvo una alta densidad arbórea, la cantidad de residuos aportados al suelo fue mayor. Ya que existe una relación directa entre los contenidos de MO y C, el mismo caso se dio para el contenido de C entre los tres sistemas, esto concuerda con la investigación realizada por Sokołowska, Józefowska, Woźnica, & Zaleski, (2020) en Polonia, donde se estudiaron tres sucesiones de bosque y no se hallaron diferencias significativas en el contenido de C. Otra causa de esta variación puede ser la altitud, ya que LE se ubica a una mayor altitud y OC a una más baja, Sánchez, Ruiz, & Ríos, (2005) encontraron que el contenido de MO está influenciado por la altitud y esta a su vez relacionado a diferentes tipos de vegetación. Yang et al. (2019) mencionan que reemplazar el bosque natural por plantaciones forestales comerciales disminuye el C almacenado en el suelo y probablemente pueda afectar el secuestro de carbono orgánico a largo plazo.

En el caso de NH_4^+ , el ANVA registró diferencias significativas. La comparación de valores medios indicó que los sistemas LE y SM no presentaron diferencias significativas, caso contrario con OC cuyo valor fue el más bajo de todos. El comportamiento del NH_4^+ puede ser relacionado con una mayor cantidad de residuos aportados al suelo en los sistemas LE y SM en donde se da una liberación de N mineral a partir del N orgánico, lenta pero constante, en el caso de OC la aportación a través de fertilización mineral el NH_4^+ se pierde rápidamente, esto es debido a que la MO, producto de la biomasa que la vegetación aporta al suelo, aumenta la cantidad de Nt y con ella la disponibilidad de NH_4^+ (Shen et al., 2020). Liu et al., (2020) mencionan que el NH_4^+ exhibe una tendencia creciente en la etapa sucesional del bosque y posteriormente se mantiene estable, esto se corroboró en este estudio ya que el sistema OC posee las características de una sucesión ecológica más temprana y LE representaría la vegetación clímax de esta sucesión, de ahí la razón por la cual LE y SM presentaron valores medios similares.

De igual manera, para el NO_3^- , hubo un fuerte rechazo de la hipótesis nula ($p=0.004$), la comparación de medias arrojó como resultado una similitud con los sistemas LE y SM, y una diferencia entre estos dos con respecto al OC, el cual obtuvo el valor más bajo, esto se debió a que en el sistema OC el contenido de nitrógeno total (Nt) fue mucho más bajo que en los otros dos sistemas. De igual manera que en el caso de NH_4^+ la MO producto de la biomasa que la vegetación aporta al suelo, produjo un aumento en la disponibilidad de Nt en el suelo (Shen et al., 2020). Yang et al. (2020) mencionan que el pH es una de las variables independientes más importante para explicar la variabilidad del NO_3^- seguido de la distribución de arena, limo y arcilla; para este estudio no se encontró una relación entre el pH del suelo con la cantidad de NO_3^- , sin embargo, se pudo observar que los sistemas que presentaban mayores porcentajes de limo y arcilla contenían menores cantidades de NO_3^- y viceversa, de igual manera, los sistemas que presentaron mayores porcentajes de arenas aumentaron la disponibilidad de NO_3^- y viceversa. Liu, Ma, Zhai, & Zhou, (2019b) hallaron que la edad del arbolado aumenta de manera significativa la disponibilidad de NO_3^- , esto

habré a la posibilidad de que los sistemas LE y SM hallan presentado mayores cantidades de este elemento, debido a que en estos la edad del arbolado es muy superior al del sistema OC.

Retomando el punto anterior, el contenido de Nitrógeno total (Nt) no arrojó diferencias estadísticamente significativas en ninguno de los casos, sin embargo, como se mencionó anteriormente, se puede observar que el valor más alto lo obtuvo el sistema LE, seguido de SM, aunque la diferencia no es muy notoria, el valor más bajo se obtuvo en el sistema OC. Esta disminución de Nt se debe a que las plantaciones comerciales, y principalmente la de los árboles de navidad, no reponen al suelo todo el N extraído con la cosecha, contrario a lo que ocurre en un bosque natural (Salgado-García et al., 2010). Una alta concentración de Nt en el suelo corresponde al efecto de acumulación de MO (Wright & Hons, 2005), la MO es producto de la biomasa que la vegetación aporta al suelo, por lo tanto, existe una relación directamente proporcional entre la cantidad de biomasa y la disponibilidad de Nt en el suelo (Shen et al., 2020).

El N_{min} mostró diferencias significativas en el ANVA, obteniendo un p-valor = 0.01, en la comparación de medias el valor más alto se encontró en SM y el más bajo en el OC, los sistemas LE y SM se comportaron de manera similar. Los resultados concuerdan con la investigación de Shen et al. (2020), quienes encontraron que el N_{min} , aumenta ligeramente al tener una mayor cobertura forestal, ya que existe una relación directa entre la cantidad de biomasa aportado al suelo con la disponibilidad de N_{min} . Por otro lado, Sanji, Kooch, & Rey, (2020) encontraron una similitud en el contenido de N_{min} en los suelos de un bosque natural y una plantación de *Alnus*, lo que indica que en bosques con morfología similar no varía la disponibilidad de este elemento, tal y como sucedió en los sistemas SM y LE. El N_{org} no presentó diferencias estadísticamente significativas en el ANVA, en el caso de la comparación de medias, se comportó de la misma manera que el Nt, encontrándose el valor más alto en LE y el más bajo en el OC. El comportamiento del N_{org} en los sistemas está respaldado por el comportamiento del Nt ya que las concentraciones son muy similares. Esto coincide con la investigación realizada por Shunbao, Yan, Xiangping, & Yanjie, (2019) donde estudiaron el

comportamiento de varios elementos, entre ellos el N_{org} en bosques naturales y plantaciones forestales y no se encontraron diferencias significativas para esta variable.

El P no presentó diferencias significativas, sin embargo, el valor más alto se obtuvo en LE y el más bajo en OC, lo anterior es debido al comportamiento de los contenidos de MO que fueron similares. Aunado a esto, el dosel abierto y el manejo silvícola aplicado en el sistema OC generan una compactación del suelo, lo que se refleja en una baja disponibilidad del P, ya que este proceso afecta el contenido de agua y así el movimiento de P en el suelo (Cabeza, 2011). Por otro lado, los sistemas que presentaban vegetación arbórea de mayores dimensiones aumentaron ligeramente el contenido de P, esto es debido a que existe una relación directa entre la cantidad de biomasa aportado al suelo con la disponibilidad de P (Shen et al., 2020). Otra causa del alto contenido de P en LE es debido a que los Andosoles son suelos que retienen considerablemente este elemento (INEGI, 2004).

Para el caso de K, se detectaron diferencias significativas en el ANVA y en la comparación de medias, el valor más alto se obtuvo en OC, seguido por SM, el más bajo se dio en LE, la textura del suelo juega un papel muy importante en la disponibilidad de este elemento, ya que entre mayor sea el % de arena, menor será la cantidad de K (Essington, 2015; Navarro y Navarro, 2014; Pinto et al., 2014). Por otro lado, la cantidad de K disminuye al aumentar la cubierta forestal, por ende, existe una relación inversa entre la cantidad de biomasa aportado al suelo con las existencias de K (Shen et al., 2020).

Para el Ca, no hubo diferencia significativa en el *p-valor*, para la comparación de medias solo hubo diferencias entre los sistemas LE y SM, el valor más alto se presentó en SM y el más bajo en LE.

Las cantidades de Ca, Mg, y K están relacionadas con la lixiviación de bases que tiene que ver con la textura del suelo así en suelos arenosos se tiene una mayor lixiviación de bases, esto se corresponde con el pH pues a mayor lixiviación de bases menor PH. (Bautista, Zinck, & Cram, 2010; Brady & Weil, 1999; Krasilnikov et al., 2013; Osman, 2013)

Para Mg, el *p-valor* y la prueba de Tukey mostraron diferencias significativas, analizando la comparación de medias se pudo observar que este parámetro se comportó de manera similar entre los sistemas SM y OC en comparación con LE, el valor más alto se presentó en OC y el más bajo en LE, esto se debe al efecto del pH ácido en el sistema LE que limita la disponibilidad de bases intercambiables como Mg, K y Ca (Palma-López et al., 2017; Salgado-García et al., 2017).

Para el caso de Fe, la fuerza de rechazo de la hipótesis nula fue muy fuerte ($p=0.0002$), y en la comparación de medias hay una marcada diferencia de valores entre el sistema LE contra SM y OC, se puede apreciar que el valor más alto se dio en LE, mientras que los otros dos sistemas presentaron valores similares. Esto se debe a que los sistemas SM y OC cuentan con un manejo silvícola y, por ende, existe una intervención del hombre y probablemente algunas propiedades químicas inherentes como el pH, tuvo un efecto en la disponibilidad de Fe en el suelo ya que fue en el sistema LE donde se encontró el valor más bajo del pH. Esto concuerda con Willy, Muyanga, Mbuvi, & Jayne, (2019), quienes hallaron una disminución de Fe en una conversión de bosque natural a suelos agrícolas, uno de los impulsores de este deterioro fue el pH.

El Cu presentó diferencias significativas en el ANVA y la comparación de medias con una similitud entre los sistemas LE y SM y una diferencia de ambas con respecto a OC, donde se presentó el valor mayor, el valor más bajo se dio en SM. Liu, Liang, Nie, Tang, & Siddique, (2019a) mencionan que una disminución del pH y elementos como el Ca, Mg, Zn, Mn y Fe disponibles, aumentan la cantidad de Cu en las capas superiores del suelo, sin embargo, para esta investigación se encontró que solo el Fe cumplió esta afirmación, contrario a esto se observó que, las altas concentraciones de Mg y Mn aumentaron la disponibilidad de Cu, no se halló ningún tipo de relación del pH, Ca y Zn con el comportamiento del Cu.

El Zn, no presentó diferencias significativas en el *p-valor*, sin embargo, la comparación de medias indica que hay una diferencia entre LE y SM, el valor más alto se obtuvo en el primero y el más bajo en el segundo sistema, respectivamente. Para Mn tampoco hubo diferencias en el *p-valor*, los valores

medios indican que el más alto fue en OC y el más bajo en LE. Algunos factores que pudieran explicar la disponibilidad de Zn y Mn en el suelo son: pH elevado, suelos arcillosos, bajo contenido de materia orgánica y altas concentraciones de Cu y Fe (Cakmak, 2014; Castellanos et al., 2000) ya que en condiciones acidas se ha visto un incremento del Zn y Mn (Jones, 2003). En suelo de bosques tropicales convertidos a plantaciones forestales se ha visto el mismo comportamiento, la disminución del pH del suelo y de elementos como el Ca, Mg, Zn, Mn y Fe disponibles, y un aumento del Cu en las capas superiores del suelo (Liu et al., 2019a).

El B presentó diferencias estadísticamente significativas ($p\text{-valor}<0.05$), la comparación de medias arrojó como resultado una similitud entre el sistema SM y OC, en comparación con LE. Precisamente en este sistema fue donde hubo el valor más alto, seguido por SM y el más bajo fue OC. Esta variación podría deberse a los usos de suelo actuales que presentan los sistemas ya que se ha visto que en sitios perturbados por actividades humanas la disponibilidad de B disminuye hasta en un 61% (Willy et al., 2019).

Zarafshar et al. (2020); realizaron un estudio sobre la calidad del suelo en plantaciones forestales y suelos agrícolas en comparación con bosques naturales, encontraron que los contenidos más bajos de nutrientes, excepto el Cu, se localizó en las áreas cultivadas, es decir, las plantaciones forestales y los bosques naturales no presentaron diferencias importantes desde el punto de vista estadístico.

Para CIC, K, Mg y Mn, el orden fue $OC>SM>LE$. Para pH y Ca el orden fue $SM>OC>LE$, Para MO, C, NH_4^+ , Nt, N_{org} , P, Fe y B el orden fue $LE>SM>OC$, otro orden encontrado fue $SM>LE>OC$, este lo presentaron el NO_3^- y N_{min} . Las últimas ordenes encontradas fue $OC>LE>SM$ para Cu y $LE>OC>SM$ para Zn. Desde el punto de vista químico, el mejor sistema fue LE con 9 variables más convenientes, seguido por OC con 5 y por último SM con 4. Es importante mencionar que el orden encontrado en las variables MO, C, NH_4^+ , Nt, N_{org} , P, Fe y B que fue $LE>SM>OC$ no fue encontrado en el comportamiento de las variables físicas.

Cuadro 16. p-valor y valores medios obtenidos en el análisis estadístico para propiedades químicas.

Variable	Valores medios / sistema			p-valor
	LE	SM	OC	
CIC (Cmol(+) Kg ⁻¹)	38.79 _b	57.03 _a	57.49 _a	<.0001
Ph	5.42 _b	6.16 _a	5.92 _{ba}	0.033
MO (%)	10.50 _a	7.95 _a	7.46 _a	0.302
C (%)	6.09 _a	4.61 _a	4.33 _a	0.303
NH ₄ ⁺ (mg/kg)	27.31 _a	27.30 _a	20.03 _b	0.029
NO ₃ ⁻ (mg/kg)	7.29 _a	7.74 _a	4.87 _b	0.004
Nt (%)	0.22 _a	0.21 _a	0.13 _a	0.181
Nt (mg/kg)	2180.00 _a	2140.00 _a	1346.70 _a	0.184
N _{min} (mg/kg)	34.60 _a	35.04 _a	24.89 _b	0.013
N _{org} (mg/kg)	2145.40 _a	2105.00 _a	1321.80 _a	0.192
P (mg/kg)	1.76 _a	1.42 _a	1.30 _a	0.510
K (mg/kg)	261.50 _b	509.30 _b	785.60 _a	0.009
Ca (mg/kg)	930.70 _b	1646.20 _a	1478.50 _{ba}	0.094
Mg (mg/kg)	91.87 _b	189.47 _a	256.20 _a	0.013
Fe (mg/kg)	78.73 _a	38.27 _b	37.16 _b	0.000
Cu (mg/kg)	0.61 _b	0.50 _b	0.94 _a	0.013
Zn (mg/kg)	1.49 _a	0.32 _b	0.53 _{ba}	0.097
Mn (mg/kg)	9.07 _b	9.89 _{ba}	13.68 _a	0.082
B (mg/kg)	1.24 _a	0.68 _b	0.24 _b	0.005

CIC = Capacidad de intercambio catiónico, MO = Materia orgánica, C = Carbono, NH₄⁺ = Amonio, NO₃⁻ = Nitrato, Nt = Nitrógeno total, N_{min} = Nitrógeno mineral, N_{org} = Nitrógeno orgánico.

4.4.3. Clasificación de las propiedades físicas y químicas de acuerdo a rangos de valores

Tanto para las propiedades físicas como químicas, en la literatura se dan clasificaciones de acuerdo con rangos de valores, donde de acuerdo con estos rangos se da una calificación cualitativa o categórica que denota la falta o el exceso de la propiedad o de la variable en cuestión. De manera general existen clasificaciones que utilizan cinco categorías que son: Muy bajo (MB), Bajo (B), Medio (M), Alto (A) y Muy alto (MA). Otras utilizan cuatro que son: Muy bajo (MB), Bajo (B), Medio (M), Alto (A). Una tercera clasificación utiliza tres categorías que pueden ser Bajo (B), Medio (M) y Alto o Deficiente (DEF), Marginal (MAR) y Adecuado (AD) (NOM-021-RECNAT, 2002).

En el Cuadro 17 se muestran las categorías de clasificación para las propiedades físicas de los tres sistemas, se observa que, de las 12 variables o propiedades físicas estudiadas, en 8 los tres sistemas recibieron la misma clasificación y solamente en 4 se tuvieron clasificaciones diferentes. Así para la estabilidad de agregados el sistema SM obtuvo la categoría de Media (M), en comparación con los sistemas LE y OC que obtuvieron una categoría de Alta (A). En cuanto a los contenidos de Arcilla el sistema OC obtuvo una categoría de Baja (B) y los sistemas LE y SM Muy baja (MB). Para el porcentaje de Limo el sistema OC obtuvo la categoría de muy alta (MA) y los sistemas LE y SA alta (A). En el caso del porcentaje de Arena el sistema LE obtuvo una categoría de muy alta (MA), SM alta (A) y OC moderada (MOD).

De acuerdo con lo anterior y bajo la clasificación de las propiedades por categorías en cuanto a la estabilidad de agregados los mejores sistemas fueron LE y OC quienes tuvieron la misma categoría (Alta). En cuanto al % de arcilla el mejor sistema fue el OC que tuvo una categoría Baja. Para el % de limo el mejor sistema fue OC quien tuvo una categoría de muy alta y en cuanto al % de arena el mejor sistema fue LE quien tuvo una categoría de Muy alta. Es importante mencionar que, en cuanto a la estabilidad de agregados a medida que la categoría sea tendiente a una mayor estabilidad será mejor para cualquier sistema. En el caso de las fracciones de arena, limo y arcilla en los sistemas, y

debido a su influencia en diferentes procesos físicos como lo es la retención de agua, aireación y drenaje el mejor sistema será aquel que tenga un balance entre los porcentajes de arena limo y arcilla, es decir que del 100 %, aproximadamente 33 % correspondan a cada fracción, teniendo una categoría de Media. Cualquier desbalance provocará un efecto positivo en algunos procesos y un efecto negativo en otros como sería el caso en la capacidad de retención de humedad y la capacidad de drenaje.

Se puede concluir que, bajo el análisis de las variables por categorías realizado, los suelos con plantaciones forestales comerciales tienen mejores características físicas que el suelo del bosque natural.

Algunas propiedades físicas usados como indicadores de calidad del suelo, que contribuyen a la diferenciación entre sistemas son DA, mf, f, CC, HA, PMP, arena y arcilla (Calderón-Medina, Bautista-Mantilla, & Rojas-González, 2018). Para esta investigación, dado que los sistemas presentaron un comportamiento similar, probablemente los porcentajes de Arena y Limo puedan ser usados para explicar el efecto del cambio de uso de suelo en sus propiedades físicas. Lo anterior es importante debido a que el comportamiento físico diferente, manifestado por estas variables, pudiera impactar al comportamiento de las propiedades químicas. Sin embargo, debe tomarse en consideración de que no existen indicadores universales que sean adecuados para todos los propósitos y contextos (Cantú, Becker, Bedano, & Schiavo, 2007).

Comparando estos resultados con los obtenidos en el ANVA y la prueba de Tukey (Cuadro 15) respecto a las diferencias significativas y las diferencias por categoría, se coincidió en los porcentajes de arena, limo y arcilla donde se marcaron diferencias por ambos procedimientos. Por otra parte, el ANVA y la prueba de Tukey fue más sensible pues además detectó diferencias significativas entre las variables CC, PMP y mf; pero no encontró diferencias para la estabilidad de agregados que si hizo el análisis por categorías. Lo anterior se debe a que el ANVA detecta las diferencias significativas con base en la variabilidad de los datos y las diferencias por categoría toma únicamente en cuenta la magnitud del valor medio.

Cuadro 17. Clasificación de las propiedades físicas por categorías de acuerdo a los valores medios obtenidos en el análisis estadístico en los tres sistemas.

Variable	Sistemas		
	LE	SM	OC
CC (%)	MA	MA	MA
PMP (%)	MA	MA	MA
HA (%)	MA	MA	MA
DA (gr/cm ³)	B	B	B
DR (gr/cm ³)	B	B	B
f (%)	MA	MA	MA
mf (%)	MA	MA	MA
Mf (%)	B	B	B
EA (%)	A	M	A
Arcilla (%)	MB	MB	B
Limo (%)	A	A	MA
Arena (%)	MA	A	MOD

MA = muy alto, A = alto, MOD = moderado, M = medio, B = bajo, y MB = muy bajo

En el Cuadro 18 se puede observar que, de las 18 propiedades químicas, 9 tuvieron la misma clasificación en los tres sistemas estudiados, estas fueron: CIC, pH, MO, C, P, K, Fe, Cu y Mn. Las variables con clasificación diferente fueron: NH₄⁺, NO₃⁻, Nt, N_{min}, N_{org}, Ca, Mg, Zn y B. El NH₄⁺, Nt, N_{min} y N_{org}, tienen en común que para los sistemas LE y SM tuvieron valores altos (A), mientras que en el OC presentaron valores medios (M). El NO₃⁻ obtuvo valores bajos (B) en los sistemas LE y SM y muy bajo (MB) para el sistema OC. En el caso del Ca y Mg, la clasificación de acuerdo con los valores de referencia indicó que este fue bajo (B) para el sistema LE y medio (M) para los sistemas SM y OC. El Zn tuvo un valor adecuado (AD) para el sistema LE, deficiente (DEF) para el sistema SM y marginal (MAR) para el OC.

Por último, tenemos el B, quien presentó un valor medio (M) para el sistema LE, bajo (B) para el sistema SM y muy bajo (MB) para el OC.

De acuerdo con lo anterior y bajo la clasificación de las propiedades por categorías para el NH_4^+ , Nt, N_{min} , N_{org} , los mejores sistemas fueron LE y SM que obtuvieron la categoría de Alto. Para NO_3^- los tres sistemas presentan deficiencias, pero la situación fue más crítica para el sistema OC quien presentó la categoría de Muy bajo. Para Ca y Mg los mejores sistemas fueron SM y OC, quienes presentaron la categoría de Medio, y en desventaja LE quien presentó la categoría de Bajo. Para Zn el mejor sistema fue LE quien presentó la categoría de Adecuado, y en desventaja los sistemas SM y OC quienes presentaron las categorías de Deficiente y Marginal respectivamente. Para el B el mejor sistema fue LE quien presentó la categoría de Medio, y en desventaja los sistemas SM y OC quienes presentaron las categorías de Bajo y Muy bajo respectivamente.

Se puede concluir que bajo el análisis de las variables por categorías realizado y en cuanto a propiedades químicas, el suelo del bosque natural tiene mejores características para el abastecimiento de nutrientes, siguiéndole el sistema SM con cobertura de plantaciones forestales comerciales para fines maderables y con mayores deficiencias el sistema OC con cobertura de árboles de navidad.

La prueba de medias de Tukey y el ANVA, detectaron diferencias estadísticamente significativas en las siguientes variables: CIC, pH, K, Fe, Cu y Mn, sin embargo, la clasificación de estos elementos con base en los valores de referencia fue la misma para todos. Contrario a lo mencionado anteriormente, las variables Nt y N_{org} , presentaron clasificaciones diferentes de acuerdo con los valores de referencia, sin embargo, en la prueba de Tukey y el ANVA, no tuvieron diferencias estadísticamente importantes. Lo anterior al igual que las variables físicas, se debe a que el ANVA detecta las diferencias significativas con base en la variabilidad de los datos, y las diferencias por categoría toma únicamente en cuenta la magnitud del valor medio.

Cuadro 18. Clasificación de las propiedades químicas por categorías de acuerdo a los valores medios obtenidos en el análisis estadístico en los tres sistemas.

Variable	Sistemas		
	LE	SM	OC
CIC (Cmol(+) Kg ⁻¹)	MA	MA	MA
pH	MOD	MOD	MOD
MO (%)	M	M	M
C (%)	M	M	M
NH ₄ ⁺ (mg/kg)	A	A	M
NO ₃ ⁻ (mg/kg)	B	B	MB
Nt (%)	A	A	M
Nt (mg/kg)	A	A	M
N _{min} (mg/kg)	A	A	M
N _{org} (mg/kg)	A	A	M
P (mg/kg)	B	B	B
K (mg/kg)	A	A	A
Ca (mg/kg)	B	M	M
Mg (mg/kg)	B	M	M
Fe (mg/kg)	AD	AD	AD
Cu (mg/kg)	AD	AD	AD
Zn (mg/kg)	AD	DEF	MAR
Mn (mg/kg)	AD	AD	AD
B (mg/kg)	M	B	MB

MA = Muy Alto, A = alto, MOD = moderado, M = medio, B = bajo, MB = muy bajo, AD = adecuado, DEF = deficiente y MAR = marginal

4.5. CONCLUSIONES

Al comparar las propiedades físicas en los tres sistemas, el sistema SM al estar ubicado en una posición más cercana al sistema LE fue más semejante en los %

de limo, % de arcilla y % de arena. Aunque el sistema Ocotol se encuentra a una distancia mayor respecto al sistema LE se dio semejanza en las propiedades físicas CC, PMP y mf. Las diferencias significativas encontradas en los valores medios siempre favorecieron a los suelos bajo plantaciones forestales comerciales, a excepción de la EA, que fue mayor en el sistema LE que es de bosque natural.

Para las propiedades químicas el sistema SM fue el más parecido a este pues solo se encontraron diferencias significativas en 7 variables que fueron CIC, pH, Ca, Mg, Fe, Zn y B. donde el sistema SM solo fue mejor en CIC, pH, Ca, y Mg y peor en Fe, Zn y B.

El sistema OC fue el menos parecido a LE pues se encontraron diferencias significativas en 10 variables que fueron CIC, NH_4^+ , NO_3^- , N_{min} , K, Mg, Fe, Cu, Mn y B. donde el sistema OC solo fue mejor en CIC, K, Mg, Cu y Mn.

Se puede concluir que el suelo con bosque natural en comparación con las plantaciones comerciales tuvo mayor diferencia en propiedades químicas fundamentales del suelo, como son la capacidad retener cationes esenciales para la nutrición de la masa forestal dada por la CIC, pH que tiene relación disponibilidad de elementos esenciales como P, Ca, Fe, Mg. Las diferencias significativas encontradas en algunos casos favorecieron a los suelos bajo plantaciones comerciales (CIC, pH, K, Ca, Mg, Cu y Mn) y en otros al bosque natural (MO, C, N en todas sus formas, P, Fe, Zn y B) que fueron mayores en este sistema.

Las variables físicas analizadas en los suelos Luvisoles con diferente cobertura y manejo, solo fueron diferentes significativamente en CC, PMP y el % de arcilla, manteniéndose con la misma capacidad en propiedades físicas fundamentales del suelo como son la capacidad de infiltrar (Mf, f), retener (mf) y almacenar agua (HA).

Las variables químicas de los suelos Luvisoles con diferente manejo y cobertura vegetal solo fueron diferentes significativamente en cinco propiedades químicas que fueron NH_4^+ , NO_3^- , N_{min} , K y Cu favoreciendo en las tres primeras al sistema SM y en las dos últimas al sistema OC, manteniéndose con la misma capacidad

en las demás propiedades químicas fundamentales, como son la capacidad de retener cationes esenciales para la nutrición de la masa forestal dada por la CIC, pH que tiene relación con la disponibilidad de elementos esenciales como P, Ca, Fe y Mg.

En relación con las diferencias entre variables físicas utilizando la prueba de Tukey y las diferencias por categorías, se coincidió en los porcentajes de arena, limo y arcilla donde se marcaron diferencias por ambos procedimientos. Por otra parte, el ANVA y la prueba de Tukey fueron más sensibles pues además detectaron diferencias significativas entre las variables CC, PMP y mf; pero no encontraron diferencias para la estabilidad de agregados que si hizo el análisis por categorías.

Para las variables químicas la prueba de medias de Tukey y el ANVA, detectaron diferencias estadísticamente significativas en las variables: CIC, pH, K, Fe y Cu, sin embargo, la clasificación con base en los valores de referencia fue la misma para todas. Contrario a lo mencionado anteriormente, las variables N_t y N_{org} , presentaron clasificaciones diferentes de acuerdo con los valores de referencia, sin embargo, el ANVA y Tukey no detectaron diferencias significativas.

Las propiedades físicas del suelo fueron más estables que las propiedades químicas ante el cambio de cobertura. La mayor parte de las propiedades que presentaron diferencias estadísticamente significativas fueron las químicas. Los suelos con los sistemas que presentaron arbolado morfológicamente similar, sus propiedades se comportaron de la misma manera, es decir, en los sistemas LE y SM que es donde la altura de los árboles fue mayor, la cantidad de nitrógeno en el suelo también se elevó, en cambio, en el sistema OC, cuya cubierta forestal es de árboles de navidad con una altura baja, la cantidad de nitrógeno en el suelo también fue menor en comparación con los otros dos sistemas. Para las propiedades físicas el mejor sistema fue SM, para las propiedades químicas el mejor sistema fue LE. La clasificación de los valores de las variables tanto físicas como químicas por rangos de valores no coincidió con la prueba del ANVA para ubicar a los valores medios como diferentes.

4.6. REFERENCIAS

- Alejandro-Martínez, P., La Cruz-Morales, D., Palma-López, D. J., Megia-Vera, H. J., & Palma-Cancino, D. J. (2019). Efecto del cambio de uso de suelo sobre las propiedades edáficas en La Sabana, Huimanguillo, Tabasco, Mexico. *AGROProductividad*, 12(7).
- Amézketa, E. (1999). Soil Aggregate Stability: A Review. *Journal of Sustainable Agriculture*, 14(2–3), 83–151. https://doi.org/10.1300/J064v14n02_08.
- 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>
- 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>.
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (1999). *The Nature and Properties of Soils* (12th ed.; P. Education, Ed.). New Jersey, USA.
- Cabeza, R. (2011). Degradación del suelo y sus efectos en la dinámica del fósforo. 174 p. Simposio Nacional de la Ciencia del Suelo. Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo, *Boletín N° 24*. p. 107-112
- Cakmak, I. (2014). ¿Por qué las plantas necesitan zinc? 3er Congreso Internacional de Nutrición y Fisiología Vegetal Aplicadas. INTAGRI. Guadalajara, Jalisco, México.
- Calderón-Medina, C. L., Bautista-Mantilla, G. P., & Rojas-González, S. (2018). Propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo, indicadores del estado de diferentes ecosistemas en una terraza alta del departamento del Meta. *Orinoquia*, 22(2), 141–157. <https://doi.org/10.22579/20112629.524>

- Camacho-Tamayo, J.H., Luengas, C.A., & Leiva, F.R. (2010). Evaluación de propiedades físicas de dosoxisoles en la altillanura colombiana mediante análisis multivariado *Suelos Ecuatoriales*, 40 (2) (2010), pp. 170-175
- Cantú, M. P., Becker, A., Bedano, J. C., & Schiavo, H. F. (2007). Evaluación de la calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices. *Ciencia Del Suelo*, 25(2), 173–178.
- Castellanos, J.Z., Uvalle-Bueno, J.X., & Aguilar-Santelises, A. (2000). Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas. Colección INCAPA. 2ª. Edición. 226 pp.
- Dou, Y., Yang, Y., An, S., & Zhu, Z. (2020). Effects of different vegetation restoration measures on soil aggregate stability and erodibility on the Loess Plateau, China. *Catena*, 185, 104294. <http://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104294>
- Duval, M., Galantini, J.A., Iglesias, J., & Krüger, H.R. (2013). El cultivo de trigo en la región semiárida bonaerense: impacto sobre algunas propiedades químicas del suelo. *RIA*, 39(2): 178-184
- Essington, M.E. (2015). *Soil and water chemistry: an integrative approach*. 2 ed. Boca Raton (USA): CRC Press, 656 p.
- García, E. (1998). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), (1998). 'Climas'(clasificación de Koppen, modificado por García). Escala 1: 1 000 000. México. Climas.
- 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>
- Hernández, J. O., Gutiérrez, M. del C., Ortiz-Solorio, C. A., Sánchez, P., & Ángeles, E. (2017). Calidad de Andosoles en sistemas forestal, agroforestal y agrícola con diferentes manejos en Zacatlán, Puebla. *Terra Latinoamericana*, 35(2), 179–189. <https://doi.org/https://doi.org/10.28940/terra.v35i2.201>

- INEGI. (2001a). Conjunto de datos vectoriales Fisiográficos. Continuo Nacional escala 1:1 000 000 serie I. Provincias fisiográficas. Retrieved February 25, 2020, 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 25, 2020, 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 25, 2020, from <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267575>
- INEGI. (2004). Guía para la interpretación de cartografía edafológica. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes, México. pp. 11-16.
- INIFAP-CONABIO. (1995). Edafología, escalas 1:250000 – 1:1000000. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias y la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México.
- Jaramillo-Jaramillo, D.F., González-Sánchez, H., & Álvarez-Mejía, F. (2008). Variabilidad espacial de algunas propiedades físico - mecánicas de suelos de textura pesada. *CES Medicina Veterinaria y Zootecnia*, 3, 10-19
- Jones, J. B. (2003). *Agronomic handbook: management of crops, soils, and their fertility*. CRC Press LLC.
- 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>
- Kooch, Y., Sanji, R., & Tabari, M. (2019). The effect of vegetation change in C and N contents in litter and soil organic fractions of a Northern Iran

- temperate forest. *Catena*, 178, 32-39.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.03.009>
- 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>
- Liu, C. A., Liang, M. Y., Nie, Y., Tang, J. W., & Siddique, K. H. (2019a). The conversion of tropical forests to rubber plantations accelerates soil acidification and changes the distribution of soil metal ions in topsoil layers. *Science of The Total Environment*, 696, 134082.
<http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134082>
- Liu, Z., Ma, P., Zhai, B., & Zhou, J. (2019b). Soil moisture decline and residual nitrate accumulation after converting cropland to apple orchard in a semiarid region: Evidence from the Loess Plateau. *Catena*, 181, 104080.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104080>
- Liu, Y., Zhu, G., Hai, X., Li, J., Shanguan, Z., Peng, C., & Deng, L. (2020). Long-term forest succession improves plant diversity and soil quality but not significantly increase soil microbial diversity: Evidence from the Loess Plateau. *Ecological Engineering*, 142, 105631.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.105631>
- Meng, M., Chen, H. Y., Lin, J., Liu, X., Guo, X., Yuan, Y., & Zhang, J. (2020). Long term forest conversion affected soil nanoscale pores in subtropical China. *Catena*, 185, 104289. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104289>
- Musálem, M. A. (2006). *Silvicultura de plantaciones forestales comerciales* (No. 634.950972 S587). Universidad Autónoma de Chapingo, Chapingo (México).
- Navarro, S. & Navarro, G. (2014). *Fertilizantes: química y acción*. 1 ed. Madrid (España): Mundi-Prensa, 241 p.
- 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: principles, properties and management*. Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-5663-2>
- Palma-López, D.J., Jiménez-Ramírez, R., Zavala-Cruz, J., Bautista-Zúñiga, F., Gavi-Reyes, F., & Palma-Cancino, D.Y. (2017). Actualización de la clasificación de suelos de Tabasco, México. *Agro Productividad* 10(12): 29-35.
- Pérez, E. J.; Escolástico, C.; Masaguer, A.; Vargas, C. & Moliner, A. (2014). Soluble organic carbon and pH of organic amendments affect metal mobility and chemical speciation in mine soils. *Chemosphere*. 103:164-171.
- Pinto, R.P.H., Lelis, N.J.A., Batista, T.M., Carvalho, G.H.O., Furtado, S.N. & Nobre, C.F. (2014). Distribuição de potássio aplicado via vinhaça em latossolo vermelho amarelo e nitossolo vermelho. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, 8(5), p.403-410.
- Salgado-García, S., Palma-López, D.J., Zavala-Cruz, J., Ortiz-García, C. F., Castelán-Estrada, M., Lagunes-Espinoza, L.C., Guerrero-Peña, A., Ortiz-Ceballos, A.I, & Córdova-Sánchez, S. (2010). Sistema integrado para recomendar dosis de fertilizantes (SIRDF): en la zona piñera de Huimanguillo, Tabasco. Colegio de Postgraduados, Cárdenas, Tabasco. México.
- Salgado-García, S., Palma-López, D.J., Zavala-Cruz, J., Ortiz-García, C. F., Lagunes-Espinoza, L.C., Ortiz-Ceballos, A.I, Córdova-Sánchez, S., & Salgado-Velázquez, S. (2017). Los suelos ácidos de la sabana de Huimanguillo, Tabasco, México. *Agro Productividad* 10(12): 16-21
- Sánchez, B. Ruiz, M. & Ríos, M.M. (2005). Materia orgánica y actividad biológica del suelo en relación con la altitud, en la cuenca del Río Maracay, estado Aragua. *Agronomía Tropical*. 55(4): 507-534.
- Sanji, R., Kooch, Y., & Rey, A. (2020). Impact of forest degradation and reforestation with *Alnus* and *Quercus* species on soil quality and function in northern Iran. *Ecological Indicators*, 112, 106132. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106132>

- Shao, G., Ai, J., Sun, Q., Hou, L., & Dong, Y. (2020). Soil quality assessment under different forest types in the Mount Tai, central Eastern China. *Ecological Indicators*, 115, 106439. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106439>
- Shen, Y., Yu, Y., Lucas-Borja, M. E., Chen, F., Chen, Q., & Tang, Y. (2020). Change of soil K, N and P following forest restoration in rock outcrop rich karst area. *CATENA*, 186, 104395. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104395>
- Shunbao, L., Yan, X., Xiangping, F., & Yanjie, Z. (2019). Soil carbon stocks in plantations and natural forests of the sub-tropics. *Acta Ecologica Sinica*, 39(6), 478-486. <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2019.04.001>
- SMN-CNA. (2019). Información estadística climatológica. Retrieved February 25, 2020, from <https://smn.cna.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>
- Sokołowska, J., Józefowska, A., Woźnica, K., & Zaleski, T. (2020). Succession from meadow to mature forest: Impacts on soil biological, chemical and physical properties—Evidence from the Pieniny Mountains, Poland. *CATENA*, 189, 104503. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104503>
- Souza, Z.M., Marques-Júnior, J., Pereira, G.T., & Sánchez-Sáenz, C.M. (2009). Spatial variability of aggregate stability in Latosols under sugarcane. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, 33 (2009), pp. 245-253
- Tan, Z., & Lal, R. (2005). Carbon sequestration potential estimates with changes in land use and tillage practice in Ohio, USA. *Agriculture, ecosystems & environment*, 111(1-4), 140-152. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.05.012>
- 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.

- Vázquez, E., Benito, M., Espejo, R., & Teutscherova, N. (2020). Response of soil properties and microbial indicators to land use change in an acid soil under Mediterranean conditions. *CATENA*, 189, 104486. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104486>
- Villagaray Yanqui, S. M. (2014). Recuperación de terrenos degradados por el cultivo de coca (*Erythroxylon coca*) En VRAEM, Perú, con aplicación de Tecnología Agroforestal. *Acta Nova*, 6(3), 210-224.
- Villafuerte, D., & García, M. del C. (2002). Ganadería y reforestación en el trópico mexicano. Explorando el ecoturismo. *Ecología de las selvas tropicales*.
- Willy, D. K., 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, 254-262. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.02.033>
- Wright, A. L., & Hons, F. M. (2005). Soil carbon and nitrogen storage in aggregates from different tillage and crop regimes. *Soil Science Society of America Journal*, 69(1):141-147. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0141a>
- Yang, Z., Chen, S., Liu, X., Xiong, D., Xu, C., Arthur, M. A., McCulley, R.L., Shi, S., & Yang, Y. (2019). Loss of soil organic carbon following natural forest conversion to Chinese fir plantation. *Forest Ecology and Management*, 449, 117476. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117476>
- Yang, S. H., Wu, H. Y., Song, X. D., Dong, Y., Zhao, X. R., Cao, Q., Yang, J.L., & Zhang, G. L. (2020). Variation of deep nitrate in a typical red soil Critical Zone: Effects of land use and slope position. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 297, 106966. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.106966>
- Zaher, H., Sabir, M., Benjelloun, H., & Paul-Igor, H. (2020). Effect of forest land use change on carbohydrates, physical soil quality and carbon stocks in Moroccan cedar area. *Journal of environmental management*, 254, 109544. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109544>
- Zarafshar, M., Bazot, S., Matinizadeh, M., Bordbar, S. K., Roustaei, M. J., Kooch, Y., Enayati, K., Abbasi, A. & Negahdarsaber, M. (2020). Do tree plantations or cultivated fields have the same ability to maintain soil quality as natural

forests?. Applied Soil Ecology, 151, 103536.
<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103536>