



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA
CARRERA DE BIOLOGÍA**

**RELACIÓN DEL CONTENIDO DE CARBONO CON LAS PROPIEDADES
FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL SUELO EN BOSQUES DE PINO DE LA
MIXTECA ALTA DE OAXACA**

**T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
B I Ó L O G A
P R E S E N T A:**

MARIANA TOVAR CASTAÑÓN

DIRECTOR:

M. EN C. RAMIRO RÍOS GÓMEZ

ASESORES:

M. EN C. FAUSTINO LÓPEZ BARRERA

DR. EZEQUIEL PÉREZ HERNÁNDEZ



CIUDAD DE MÉXICO

ENERO, 2024



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

El presente trabajo fue realizado en el Laboratorio de Edafología de la Unidad de Investigación en Sistemática Vegetal y Suelo L-8 planta alta, de la Unidad Multidisciplinaria de Investigación Experimental Zaragoza, UMIEZ, en la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM. Bajo la dirección del M. en C. Ramiro Ríos Gómez y el soporte económico de la beca PAPIIT de la DGAPA, IN222521.

Dedicada a mi mamá, hermana e hija.

Agradecimientos

A mi mamá y a Juan Simplicio Hernández, este pequeño logro, como muchos otros, es de ustedes, sin su apoyo y las oportunidades que me brindaron, esto no hubiera sido posible.

A mi asesor, el M. en C. Ramiro Ríos Gómez, gracias por su apoyo, por abrirme las puertas del laboratorio, por sus consejos y por contagiarme su pasión por el suelo, usted ha sido fundamental para que, al día de hoy, quiera seguir estudiando este recurso.

A el Dr. Faustino López Barrera, por siempre escucharme, darme ánimos y apoyarme en cualquier cosa que requería, por todas sus intervenciones que me ayudaron a seguir adelante pese a cualquier problema que se presentara.

A los miembros del jurado, por todo su tiempo invertido en las revisiones, por sus correcciones y consejos que hicieron de este, un mejor trabajo.

A el M. en C. Patricio Sánchez Guzmán y a la Dra. Blanca Lucía Prado Pano, por apoyarme con la realización de estudios de laboratorio en sus instituciones y por sus retroalimentaciones a mi trabajo, fundamentales para poderlo concluir.

A el M. en C. Juan Manuel Valderrábano Gómez, gracias a usted, a sus clases y su pasión por este recurso, yo me encuentro en esta área, gracias por abrirme las puertas del laboratorio desde primer semestre, pues desde ese momento supe a qué me quería dedicar, usted es el pilar de éste gran sueño.

A la LCT. Xochitl Tapia Sánchez, gracias por apoyarme y guiarme con tu experiencia, por siempre ayudarme con cualquier duda que tuviera y por tu paciencia, has sido fundamental en mi desarrollo como futura edafóloga.

A María José, Natalia y Cinthia, gracias por su amistad sincera desde el primer día que las conocí, por apoyarme y darme ánimos en cada momento, estar con ustedes es un abrazo al alma.

A Andrea, el ser más risueño y noble, quien desde el día uno que la conocí me ha apoyado de múltiples maneras, y a Kasandra, la persona más linda que conozco, siempre apoyándome, gracias por su amistad sincera y pura, ustedes me inspiran diario a cumplir los sueños que hablábamos desde primer semestre.

A Naomi, mi compañera de aventuras, gracias por tu apoyo, por tus palabras y por tu bonito existir, gracias por impulsarme a siempre hacer algo nuevo y salir de mi zona de confort.

A Claudia, mi compañera de tesis, sólo tú y yo sabemos el camino de este trabajo, gracias por la fortaleza que me brindaste cuando el camino se complicaba, sin ti, todo este proceso hubiera sido más difícil de lo que fue, fuiste una bocanada de aire fresco en cada situación que se presentaba.

A Diana Saldívar, Selene González, Nathalia Salcedo, Manuel Enriquez y David Trejo, a ustedes y a mis demás amigos que he hecho a lo largo de mi transitar universitario, gracias, porque sin ustedes, esto no hubiera sido posible,

¡Lo logramos!

Índice general

Resumen.....	1
1. Introducción	2
2. Marco teórico.....	2
2.1 Efecto del carbono orgánico en propiedades del suelo	5
2.1.1 <i>pH</i>	5
2.1.2 <i>Capacidad de intercambio catiónico (CIC)</i>	6
2.1.3 <i>Relación C/N</i>	7
2.1.4 <i>Agregación del suelo</i>	7
2.1.5 <i>Estructura</i>	7
2.1.6 <i>Color del suelo</i>	8
2.1.7 <i>Degradación del suelo y la importancia de la materia orgánica</i>	9
2.1.8 <i>Bosques templados en México</i>	10
3. Planteamiento del problema.....	10
3.1 Pregunta	11
3.2 Hipótesis	11
3.3 Justificación	11
3.4 Objetivo general.....	11
3.5 Objetivos particulares	11
4. Sitio de estudio.....	12
.....	13
4.1 Geología.....	13
4.2 Geoforma	15
4.3 Fisiografía	15
4.4 Vegetación y uso de suelo.....	15
4.5 Clima.....	16
4.6 Edafología	16
5. Métodos	18
5.1 Diseño experimental y trabajo de campo.....	18
5.2 Trabajo de laboratorio.....	18
5.2.1 <i>Capacidad de intercambio catiónico (CIC) y bases intercambiables</i>	19
5.2.2 <i>Carbono orgánico</i>	19
5.2.3 <i>Nitrógeno</i>	20

5.2.4	<i>pH y Conductividad eléctrica</i>	20
5.2.5	<i>Textura</i>	20
5.2.6	<i>Densidad real</i>	21
5.2.7	<i>Densidad aparente</i>	21
5.3	<i>Identificación de suelos</i>	22
5.4	<i>Análisis estadístico</i>	22
6.	Resultados	23
6.1.1	<i>Procesos edafogénicos y clasificación del suelo</i>	23
6.2	Carbono orgánico y su relación con propiedades físicas y químicas del suelo	27
6.2.1	<i>Carbono orgánico y la profundidad</i>	27
6.2.2	<i>Carbono orgánico y densidad real</i>	30
6.2.3	<i>Carbono orgánico y la densidad aparente</i>	30
6.2.4	<i>Carbono orgánico y arcilla</i>	30
6.2.5	<i>Carbono orgánico y limo</i>	31
6.2.6	<i>Carbono orgánico y arena</i>	31
6.2.7	<i>Contenido de carbono y la relación con el pH</i>	32
6.2.8	<i>Contenido de carbono orgánico y la relación con la conductividad eléctrica</i>	32
6.2.9	<i>Contenido de carbono orgánico y la relación con la capacidad de intercambio catiónico (CIC)</i>	33
6.2.10	<i>Contenido de carbono orgánico y la relación con el nitrógeno</i>	33
6.2.11	<i>Contenido de carbono orgánico y la relación con magnesio</i>	34
6.2.12	<i>Contenido de carbono orgánico y la relación con el sodio</i>	34
6.2.13	<i>Contenido de carbono orgánico y la relación con el potasio</i>	34
6.2.14	<i>Contenido de carbono orgánico y la relación con calcio</i>	35
6.3	Análisis estadísticos	38
6.3.1	<i>Correlación de Pearson</i>	38
6.3.2	<i>Modelos de regresión lineal</i>	38
7.	Discusión	40
7.1	Procesos edafogénicos y clasificación de suelos	40
7.2	Carbono orgánico y su relación con propiedades físicas y químicas del suelo	41
7.2.1	<i>Carbono orgánico y la profundidad</i>	41
7.2.2	<i>Carbono orgánico y la densidad aparente</i>	44
7.2.3	<i>Carbono orgánico y pH</i>	44

7.2.4 Contenido de carbono orgánico y la relación con el nitrógeno	46
7.2.5 Contenido de carbono orgánico y la relación con la capacidad de intercambio catiónico (CIC)	47
7.2.6 Contenido de carbono orgánico y la relación con calcio	47
7.2.7 Contenido de carbono orgánico y la relación con magnesio	48
8. Conclusiones	49
9. Bibliografía	50

Índice de Figuras

Figura 1. Sitio de muestreo en Santiago Nejapilla	12
Figura 2. Diagrama de sitio de muestreo en San Andrés Lagunas	13
Figura 3. Sitios de estudio, San Andrés Lagunas y Santiago Nejapilla	14
Figura 4a. Perfil de suelo descrito en San Andrés Lagunas: a) Somerirendzic Leptosol (Hyperhumic)	23
Figura 4b. Perfil descrito en Santiago Nejapilla: b) Eutric Chromic Andic Cambisol (Colluvic, Profundihumic, Loamic, Magnestic)	23
Figura 5. Descripción morfológica de campo en San Andrés Lagunas de Somerirendzic Leptosol (Hyperhumic)	24
Figura 6. Descripción morfológica de campo en Santiago Nejapilla de un Eutric Chromic Andic Cambisol (Colluvic, Profundihumic, Loamic, Magnestic)	25
Figura 7. Gráficas de carbono y propiedades físicas y químicas del suelo	36
<i>Figura 7a. Relación del carbono y profundidad del suelo</i>	<i>36</i>
<i>Figura 7b. Relación del carbono y densidad real</i>	<i>36</i>
<i>Figura 7c. Relación del carbono y densidad aparente</i>	<i>36</i>
<i>Figura 7d. Relación del carbono y arcilla</i>	<i>36</i>
<i>Figura 7e. Relación del carbono y limo</i>	<i>36</i>
<i>Figura 7f. Relación del carbono y arena</i>	<i>36</i>
<i>Figura 7g. Relación del carbono y pH</i>	<i>36</i>

<i>Figura 7h. Relación del carbono y conductividad eléctrica</i>	36
<i>Figura 7i. Relación del carbono y capacidad de intercambio catiónico</i>	36
<i>Figura 7j. Relación del carbono y nitrógeno</i>	37
<i>Figura 7k. Relación del carbono y magnesio</i>	37
<i>Figura 7l. Relación del carbono y sodio</i>	37
<i>Figura 7m. Relación del carbono y potasio</i>	37
<i>Figura 7n. Relación del carbono y calcio</i>	37

Índice de Cuadros

Cuadro 1. Características de sitios de estudio: San Andrés Lagunas y Santiago Nezapilla.....	17
Cuadro 2. Propiedades morfológicas y físicas de Somerirendzic Leptosol (Hyperhumic) y Cambisol.....	28
Cuadro 3. Propiedades químicas de Somerirendzic Leptosol (Hyperhumic) y Cambisol	29
Cuadro 4. Correlación de Pearson entre carbono orgánico y variables del suelo.....	38
Cuadro 5. Modelos de regresión lineal relacionando carbono orgánico con cada variable.....	39

Resumen

El carbono orgánico (CO) es el principal elemento presente en la materia orgánica del suelo (MOS), esta tiene la capacidad de modificar las propiedades físicas y químicas del suelo en su proceso de descomposición y complejación con la parte mineral. El objetivo de esta investigación fue estudiar la influencia del carbono orgánico en las propiedades físicas y químicas de un Somerirendzic Leptosol (Hyperhumic) y de un Cambisol en Bosques de Pino en los horizontes descritos para cada suelo. La investigación se realizó en dos sitios, San Andrés Lagunas y Santiago Nejapilla, ambos en bosques de pino ubicados en Oaxaca, en diferente posición en la pendiente (cumbre y pie). En cada sitio se realizó la descripción de un perfil y se tomaron muestras inalteradas de cada horizonte para su análisis físico y químico. En laboratorio se determinó la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y bases intercambiables, carbono orgánico, nitrógeno total, pH, conductividad eléctrica, textura, densidad real y densidad aparente. Los resultados se sometieron a un análisis de correlación de Pearson y se realizaron modelos de regresión lineal múltiple. Los suelos se clasificaron como: Somerirendzic Leptosol (Hyperhumic) y Eutric Chromic Andic Cambisol (Colluvic, Profundihumic, Loamic, Magnesic). El Somerirendzic Leptosol (Hyperhumic) presenta un horizonte móllico con un contenido de COS de 128 g kg^{-1} en comparación del Cambisol el cual presenta menor contenido de COS con 43.8 g kg^{-1} . Existen 5 propiedades con relación significativa entre el COS: densidad aparente ($r = -0.962$), capacidad de intercambio catiónico ($r = 0.838$), nitrógeno ($r = 0.987$), magnesio ($r = -0.941$) y calcio ($r = 0.983$). Por lo anterior, el suelo que presenta más relaciones beneficiosas entre el carbono y sus propiedades es el Somerirendzic Leptosol (Hyperhumic), gracias a su contenido alto de calcio que favorece a la estabilización del humus por su pH óptimo y una buena CIC favoreciendo el intercambio de cationes con la vegetación y una densidad aparente baja generando un suelo con mayor aireación.

1. Introducción

El carbono orgánico desempeña un papel fundamental en la modificación y mejora de diversas propiedades del suelo, lo que a su vez influye en su calidad, sustentabilidad y capacidad productiva. La Materia Orgánica del Suelo (MOS), compuesta por residuos de plantas y animales en diferentes estados de descomposición, junto con el carbono orgánico del suelo (COS) así como la biomasa microbiana está relacionada con las propiedades biológicas, físicas y químicas del suelo (Six *et al.*, 2002). El COS tiene un impacto significativo en aspectos clave como el pH, estructura, textura, densidad aparente, capacidad de intercambio catiónico y el contenido de nitrógeno del suelo. Estas propiedades son esenciales para el desarrollo de cultivos saludables y la sostenibilidad de los ecosistemas terrestres.

En la mayoría de los suelos la MOS es el principal agente que estimula la formación y estabilización de agregados, que se diferencian según su tamaño en macroagregados y microagregados. La incorporación de la materia orgánica a los agregados del suelo la protege de la descomposición rápida, determinando su estabilidad en el suelo (Zagal y Córdova, 2005). La incorporación de materia orgánica en el suelo no solo estimula la formación y estabilización de agregados, que es de suma importancia para la aireación del suelo repercutiendo en la permeabilidad del mismo, sino que también regula el pH, la estructura, densidad aparente, capacidad de intercambio catiónico y la disponibilidad de nitrógeno. En este contexto, comprender cómo el carbono orgánico interactúa con las propiedades físicas y químicas y cómo se modifican en diferentes tipos de suelo con distintos procesos de formación, se convierte en un elemento clave para la comprensión y el manejo sostenible de nuestros recursos naturales.

2. Marco teórico

El suelo es un reservorio importante de carbono, se considera que almacena el doble de C que la atmósfera y la vegetación, además, se sugiere que el contenido en los ecosistemas forestales se encuentra en el suelo (Arroyo-Ortega *et al.*, 2021).

El carbono orgánico del suelo (COS), afecta la mayoría de las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo vinculadas a su calidad, sustentabilidad y capacidad productiva. A lo largo del tiempo actividades antropogénicas como la deforestación y el cambio de uso de suelo promueven una disminución del aporte de materia orgánica, por lo que modifican la estructura del suelo, reducen la biodiversidad y conducen a la erosión (Arroyo-Ortega *et al.*, 2021)

Este elemento en los suelos puede encontrarse en forma orgánica e inorgánica, este último suele encontrarse en formas estables como CaCO_3 , MgCO_3 , CO_2 , HCO_3^- y CO_3^- (Martínez *et al.*, 2008). También se encuentra en forma de residuos orgánicos poco alterados de vegetales, animales y microorganismos, en forma de humus y en formas muy condensadas de composición próxima al C elemental. En condiciones naturales, el C orgánico del suelo resulta del balance entre la incorporación al suelo del material orgánico fresco y la salida de C del suelo en forma de CO_2 a la atmósfera, erosión y lixiviación. Cuando los suelos tienen condiciones anaeróbicas, una parte importante del carbono que ingresa al suelo es lábil, se mineraliza rápidamente y una pequeña fracción se acumula como humus estable. El CO_2 que va a la atmósfera se puede producir por mineralización de la materia orgánica del suelo (MOS) donde participa la fauna edáfica y los microorganismos del suelo, también se genera por el metabolismo de las raíces de las plantas.

Se conoce como materia orgánica del suelo (MOS) a un conjunto de residuos orgánicos de origen animal y/o vegetal, que están en diferentes etapas de descomposición y que se acumulan tanto en la superficie como dentro del perfil del suelo. Además, incluye una fracción viva, o biota, que participa en la descomposición y transformación de los residuos orgánicos (Aguilera, 2000).

El COS es el principal elemento que forma parte de la MOS, en ésta se distingue una fracción lábil, disponible como fuente energética, que mantiene las características químicas de su material de origen (hidratos de carbono, ligninas, proteínas, taninos, ácidos grasos), y una fracción húmica, más estable, constituida por ácidos fúlvicos, ácidos húmicos y huminas (Aguilera, 2000; Galantini, 2002). Las sustancias húmicas son el principal componente de la MOS y representan, por lo menos el 50 % de ésta, son el material orgánico más abundante del medioambiente terrestre. Las huminas incluyen una amplia gama de compuestos químicos insolubles en medio acuoso y contienen, además, compuestos no húmicos como largas cadenas de hidrocarburos, ésteres, ácidos y estructuras polares, que pueden ser de origen microbiano como polisacáridos y glomalina, asociados a minerales del suelo (Hayes y Clapp, 2001). Las huminas representan más del 50 % de COS en suelos minerales (Kononova, 1966) y más del 70 % en sedimentos litificados (Hedge *et al.*, 1995).

La cantidad de COS que existe en un suelo está determinada por un equilibrio entre las tasas de entrada de carbono orgánico (vegetación, raíces) y salida (CO₂ de la descomposición microbiana). Sin embargo, el tipo del suelo, el clima, el manejo, la composición mineral, la topografía, la biota del suelo y las interacciones entre cada uno de ellos son factores modificadores que afectarán la cantidad total de COS en un suelo, así como la distribución de este mismo conforme a la profundidad (Krull *et al.*, 2004).

Las funciones de la MOS se pueden clasificar en tres grupos de acuerdo a Krull *et al.*, 2004:

- 1) Física: Mejora la estabilidad estructural del suelo en varias escalas
- 2) Biológica: Proporciona una fuente de energía para procesos biológicos, reserva de nutrientes y contribución a la resiliencia del sistema suelo/planta.

- 3) Química: Contribuye a la capacidad de intercambio catiónico y mejora la capacidad de los suelos para amortiguar los cambios en el pH.

La fracción húmica se considera el depósito principal contribuyendo a la capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo, mientras que la estructura del suelo es proporcionada y mantenida por las fracciones húmicas y de carbono orgánico particulado (COP). Aquí, esta fracción juega un papel importante en suelos arenosos como un medio para unir físicamente las partículas. Para suelos con un mayor contenido de arcilla, los materiales húmicos y el COP son necesarios para desarrollar un soporte estructural óptimo, debido a la unión química y física que se ve inmiscuida (Krull *et al.*, 2004).

2.1 Efecto del carbono orgánico en propiedades del suelo

2.1.1 pH

El pH indica las concentraciones de iones hidrógeno en la solución del suelo, este parámetro es de suma importancia ya que indica si un suelo contiene niveles tóxicos de aluminio y manganeso. Este parámetro regula la disponibilidad de nutrientes esenciales para las plantas (Rivera *et al.*, 2018)

La MOS afecta el pH por los distintos grupos activos que aportan grados de acidez, con lo que actúa en la solubilización de minerales (Aguilera, 2000). A largo plazo, el aumento de pH puede deberse a la liberación por mineralización de las bases de cambio contenidas en los compuestos orgánicos y por el contenido inicial de nitrógeno. El contenido de nitrógeno en los materiales vegetales provoca un aumento inicial por la formación de amonio (NH_4^+) que consume protones, la posterior nitrificación del NH_4^+ en nitrato (NO_3^-) resulta en una disminución del pH por los protones en la solución del suelo. La disminución del pH por formación de NO_3^- no consigue alcanzar los niveles originales de acidez dado que una alta concentración de NH_4^+ tiene un efecto

inhibidor de la nitrificación. Por otro lado, la MOS tiene grupos carboxílicos y fenólicos que se comportan como ácidos débiles y tienden a disminuir el pH del suelo (Carrasco, 1992).

Krull *et al.*, 2004, mencionan que la disponibilidad de diferentes grupos funcionales (por ejemplo, ácido carboxílico, fenólico, alcohólico, etc.) permite que la MOS actúe como amortiguador en una amplia gama de valores de pH del suelo. La capacidad de amortiguamiento de cambios en el pH del suelo es mayor si el suelo superficial se encuentra rico en materia orgánica, ya que los grupos funcionales pueden actuar como pares conjugados ácido-base regulando el intercambio de iones en la solución edáfica (Van Rensburg *et al.*, 2009).

2.1.2 Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) se define como la medida de la capacidad total de un suelo para retener cationes intercambiables e indica la carga negativa presente por unidad de masa de suelo (Peverill *et al.*, 1999). Una CIC alta se considera favorable ya que contribuye a la capacidad de los suelos para retener cationes de nutrientes vegetales. Los suelos pueden tener carga permanente y carga variable. La carga permanente es derivada de ciertas arcillas (por ejemplo, la esmectita) cuando el magnesio es remplazado por aluminio o silicio por aluminio. La carga variable puede ser proporcionada por minerales arcillosos y materia orgánica, depende de la fuerza iónica y el pH, por lo tanto, está influenciado por el entorno químico (Krull *et al.*, 2004).

La CIC es una propiedad química del suelo estrechamente vinculada a su fertilidad, depende de los coloides inorgánicos (arcillas cristalinas, geles amorfos, óxidos y sesquióxidos de hierro y aluminio) y del contenido de MOS. La mayoría de los suelos tienen una carga permanente y otra que varía con el pH, observándose un aumento de la CIC con el pH. Se considera que la CIC permanente proviene de la fracción de arcilla, mientras que la CIC variable depende de las sustancias húmicas que proporcionan cargas negativas provenientes de grupos funcionales de la

materia orgánica. La forma más común de interacción entre COS y cationes es mediante reacciones de intercambio catiónico, esto es, entre los grupos carboxílicos cargados negativamente y los cationes (Krull *et al.*, 2004). El pH contribuye a la CIC ya que la disociación de grupos funcionales a $\text{pH} > 5$ aumenta el número de sitios cargados negativamente, además, una disminución de la CIC a pH bajo podría estar relacionada con bloqueo de sitios de intercambio por hierro, aluminio e hidrógeno (Krull *et al.*, 2004)

2.1.3 Relación C/N

La materia orgánica está estrechamente relacionada con el contenido de nitrógeno, ya que este define la velocidad y el equilibrio entre procesos de mineralización y humificación de la materia orgánica. Para conocer la velocidad de proliferación de microorganismos y la rapidez con la que la materia orgánica se mineraliza, se utiliza la relación entre el carbono orgánico y nitrógeno total. Valores altos implican que la materia orgánica se descompone lentamente, ya que los microorganismos inmovilizan el nitrógeno, valores bajos corresponden a una mineralización y rotura de tejidos rápida, ya que la actividad microbiana se estimula (Gamarra *et al.*, 2018).

2.1.4 Agregación del suelo

El carbono orgánico del suelo tiene un efecto importante en la agregación de las partículas del suelo (Follet y Stewart, 1985), existiendo una relación entre tamaño de los agregados y contenido de COS. Mientras mayor es el contenido de COS lábil, mayor es el tamaño de los agregados e incrementa la estabilidad de los mismos.

2.1.5 Estructura

La estructura del suelo depende de las interacciones entre las partículas primarias y los constituyentes orgánicos para formar agregados estables, existiendo una relación entre el tamaño de los agregados y contenido de C. Los agregados de menor tamaño están asociados a la fracción

altamente humificada (Buyanovsky *et al.*, 1994). En suelos con bajo contenido de materia orgánica el complejo órgano-mineral se consideran de gran importancia en cantidad y capacidad como reservorios de nutrientes a mediano y largo plazo (Caravaca y Albaladejo, 2004).

La estabilidad estructural del suelo se refiere a la resistencia del suelo al reordenamiento estructural de los poros y partículas cuando se exponen a diferentes tensiones. La adición de MOS reduce la densidad aparente (DA) y aumentar la capacidad de retención de agua pero también aumenta la estabilidad de agregados del suelo. Como menciona Greenland *et al.*, (1975), cuando el COS < 2 % los agregados del suelo se consideran inestables, moderadamente estables en 2-2.5 % y muy estable con contenidos de COS > 2.5 %. Sin embargo, se considera que esto puede variar dependiendo el tipo de suelo y su génesis (Doran y Safley, 1997; Kay y Angers, 1999).

2.1.6 Color del suelo

El color del suelo puede indicar diferentes condiciones del mismo, generalmente se asocia positivamente los colores marrones oscuros cerca de la superficie del suelo, pues se relaciona con altos niveles de materia orgánica, buena agregación del suelo y altos niveles de nutrientes (Peveřill *et al.*, 1999). El color puede asegurar buenas propiedades térmicas, que a su vez contribuyen a calentamiento del suelo pues alrededor del 10 % de la energía solar que llega a la superficie de la tierra es realmente absorbida por el suelo. Naturalmente, los suelos de color oscuro absorben más energía que los de color claro. Sin embargo, esto no implica que los suelos de color oscuro sean siempre más cálidos, pues los suelos de color oscuro por una alta cantidad de materia orgánica, contienen más cantidades de agua y se requiere una mayor cantidad de energía para calentar suelos más oscuros que los de colores más claros. Además, la cubierta superficial del suelo afecta la transferencia de calor dentro y fuera del suelo, ya que los suelos sin cubierta vegetal se calientan y se enfrían más rápidamente que aquellos con mantillo (Krull *et al.*, 2004).

2.1.7 Degradación del suelo y la importancia de la materia orgánica

Se estima que en México más del 43 % de los suelos presentan diferentes grados de degradación que varían de ligero a extremo, provocado por la acción humana por cambios en el uso del suelo, el sobrepastoreo y los sistemas de laboreo; 36.6 % de los suelos presentan erosión hídrica que se manifiesta en la pérdida de la capa superficial (25.3 %), deformaciones del terreno (11.6 %) y sedimentos (0.6 %). La Mixteca Alta Oaxaqueña (MAO) presenta índices altos de erosión que están presentes en más de 60 % del área, la tasa de pérdida es mayor a 200 toneladas ha⁻¹, principalmente por el abandono de la agricultura, el sobrepastoreo y el uso de la agricultura tradicional, esto provocó una alta vulnerabilidad, favorecida por las pendientes pronunciadas, alta precipitación y suelos arcillosos fácilmente erosionables (Sandoval-García *et al.*, 2021).

En Oaxaca, la SEMARNAT-CP (2003) ubica 1 675 321 hectáreas de la superficie del estado afectada por erosión hídrica, con 95 % con la pérdida de la capa superficial y el resto con deformaciones del terreno. Diversos estudios sitúan a la Mixteca como la región con el mayor grado de erosión de los suelos a nivel mundial y reconocen que lo que era una zona cubierta con bosque fue deforestada paulatinamente, lo que propició el deterioro de los suelos que se agravó con la introducción de la ganadería caprina, la sobreexplotación de los recursos forestales (para madera y carbón), que provocó la degradación acelerada de los suelos, dejando laderas con afloramiento del material parental, pérdida de superficie cultivable, en la época de la colonia, el abandono de las prácticas tradicionales de producción agrícola y la migración (Santiago-Mejía, *et al.*, 2018).

Los ecosistemas de la región Mixteca han estado sometidos a la deforestación, el sobrepastoreo y prácticas agrícolas inadecuadas y como resultado los suelos se han degradado. Oaxaca tiene una importante producción agrícola, en su territorio se siembra: maíz, frijol, cacahuate, trigo, sorgo, café, limón, mango, maguey mezcalero (que es la bebida tradicional de la región), copra y hule,

siendo éstos los cultivos más representativos. Además, cuenta con frutales que le han dado fama a Oaxaca, por ejemplo, la piña de Loma Bonita y el chicozapote de la región de la Cañada (SADER, 2017).

La importancia de la materia orgánica del suelo es gracias a la protección que le brinda contra la degradación, un suelo con buen contenido de MOS es poco susceptible a la erosión y compactación, favorece la infiltración de agua, estabiliza y mantiene las partículas del suelo en forma de agregados, y puede generar vegetación con alto contenido de nutrientes.

2.1.8 Bosques templados en México

Los bosques templados en México son el segundo bioma más extenso del país de acuerdo a Rzedowski (1992), actualmente ocupan el 16 % de territorio nacional con 323,300 km² (CONABIO, 2020), este ecosistema es uno de los más diversos, albergan una alta diversidad biológica debido a la presencia de diferentes tipos de vegetación: 1) bosque de pino, 2) bosque de encino, 3) bosques mixtos de pino y encino y 4) bosques de *Abies*. Se han estimado 50 especies de pinos y 140 especies de encinos pertenecientes al estrato arbóreo, estas cifras representan el 50 % y 50 % respectivamente del total a escala mundial de cada género (Galicia *et al.*, 2016; Gama, 2022).

De acuerdo a Gama (2022), los bosques templados al tener un problema fuerte de deforestación se ven afectados los flujos de energía, materia y ciclos biogeoquímicos, esto junto con las condiciones climáticas en alta montaña (presión atmosférica, clima, temperatura, precipitación) favorece el dominio de diferentes comunidades herbáceas que gracias al tipo de raíz que presentan contribuyen a una mayor entrada de materia orgánica, a la agregación del suelo y a una mejora del pH y textura.

3. Planteamiento del problema

Influencia del carbono orgánico en las propiedades físicas y químicas en suelos forestales.

3.1 Pregunta

¿Cómo se relaciona la cantidad de carbono orgánico con las propiedades físicas y químicas bajo bosques de pino?

3.2 Hipótesis

Se sabe que el incremento del carbono orgánico favorece la capacidad de intercambio catiónico, reduce la densidad aparente, mejora la estructura y estabilidad de agregados, por lo que los suelos con mayor contenido de carbono presentarán niveles favorecedores en sus propiedades físicas y químicas.

3.3 Justificación

Los suelos contienen más carbono que la suma existente en la vegetación y la atmósfera, se estima que el 81 % del carbono orgánico está involucrado activamente en el ciclo del carbono orgánico del suelo (Wattel-Koekkoek *et al.*, 2001). Debido a esto es necesario estudiar la dinámica de este elemento en distintos tipos de suelos para poder implementar medidas de manejo adecuado y preservación.

3.4 Objetivo general

- Estudiar la influencia del carbono en las propiedades físicas y químicas de un Somerirendzic Leptosol (Hyperhumic) y un Cambisol en Bosques de Pino a diferentes profundidades

3.5 Objetivos particulares

- Identificar los grupos de suelos con base en la WRB 2015 de los bosques de Pino en los sitios de estudio.

- Estudiar la distribución del carbono orgánico a través del perfil edáfico
- Conocer la dinámica del carbono con respecto a las propiedades físicas y químicas de un Somerirendzic Leptosol (Hyperhumic) y un Eutric Cambisol.

4. Sitio de estudio

El sitio de estudio se encuentra en los bosques templados del estado de Oaxaca. El primer lugar está en San Andrés Lagunas, Oaxaca en las coordenadas $17^{\circ} 32' 31.8''$ N, $96^{\circ} 31' 53.1''$ W (Figura 3) a una elevación de 2,400 m s.n.m, es un sitio donador con orientación suroeste, con pendiente de 16 % (Cuadro 1 y figura 1). El segundo sitio está ubicado en el municipio de Santiago Nejapilla en las coordenadas $17^{\circ} 24' 16''$ N, $97^{\circ} 23' 25''$ W (Figura 3) a una elevación de 2589 m s.n.m, es un sitio receptor con orientación este, con una pendiente de 8 % (Cuadro 1 y figura 2).

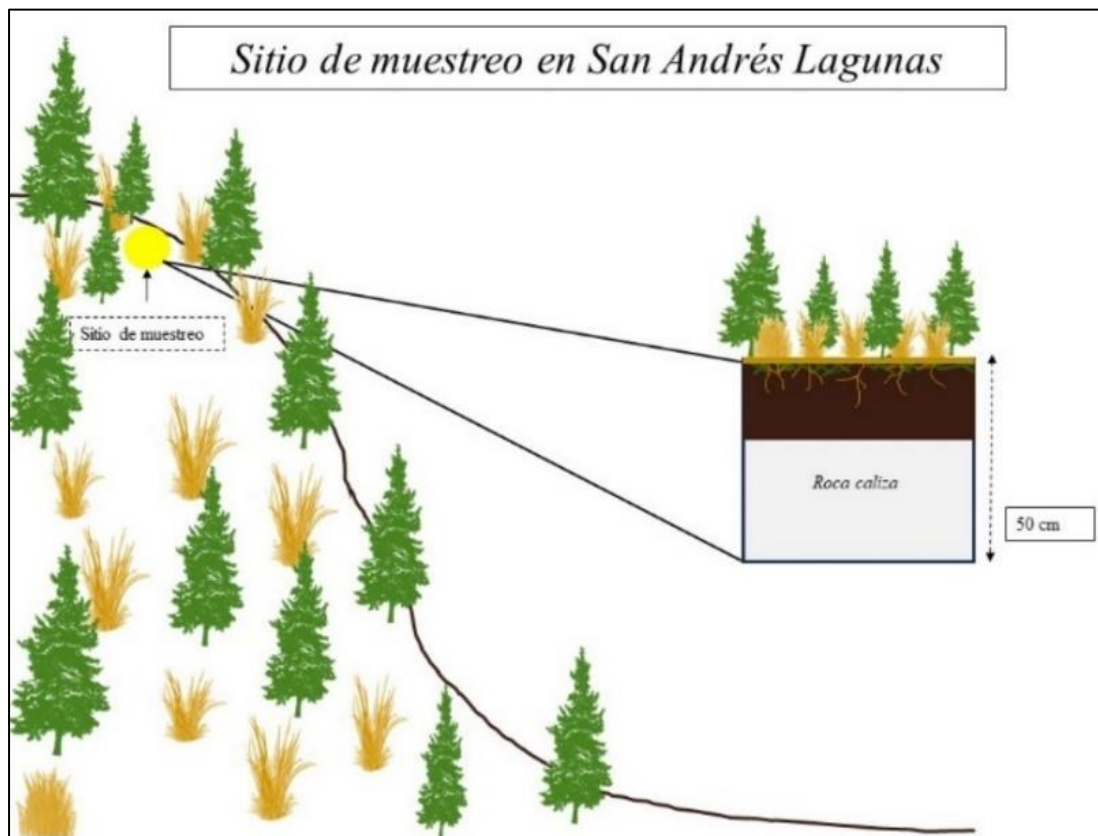


Figura 1. Diagrama de sitio de muestreo en San Andrés Lagunas

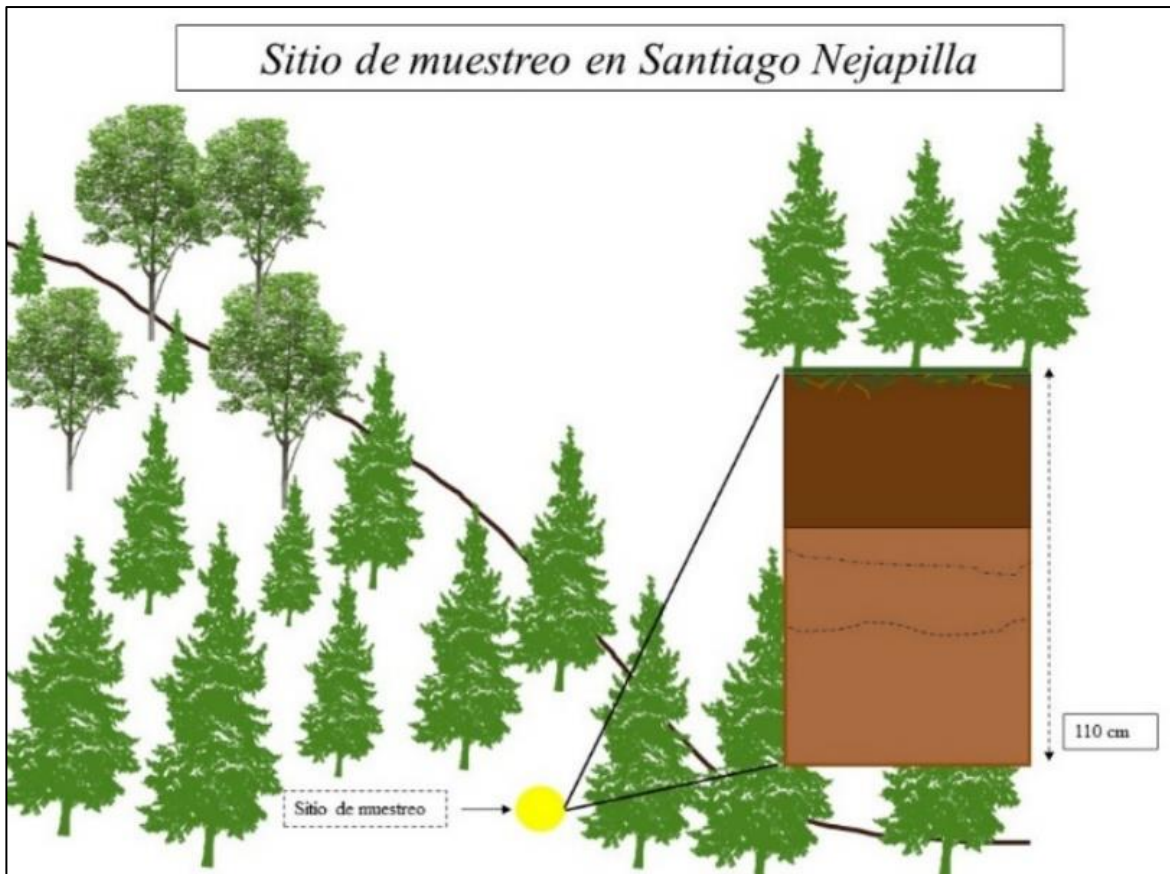


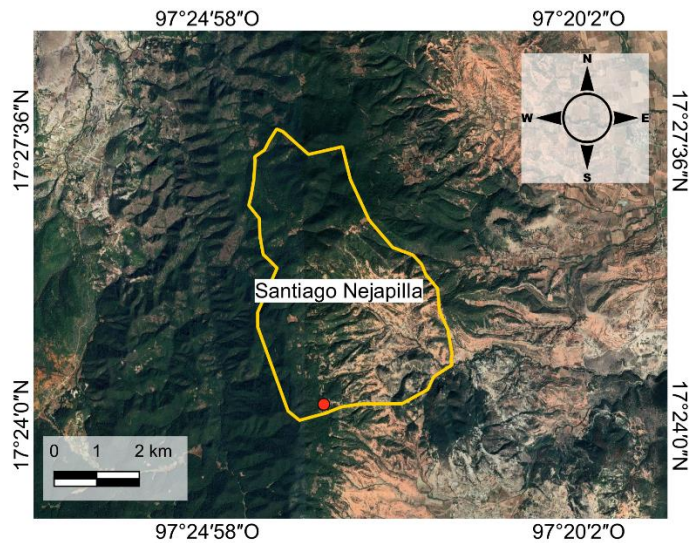
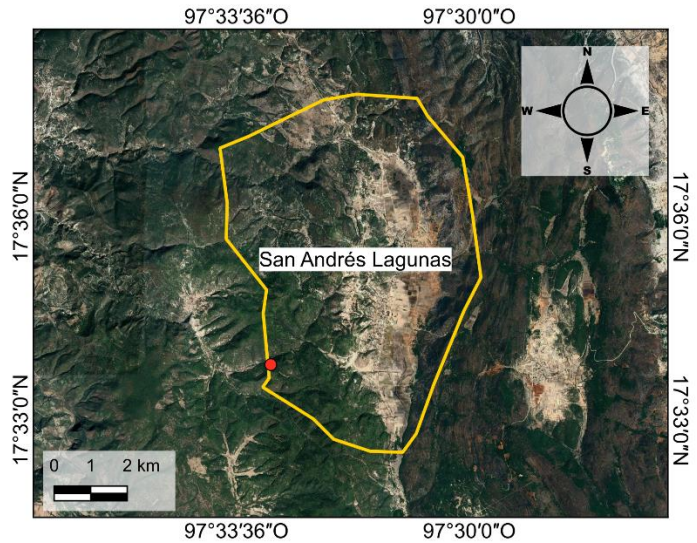
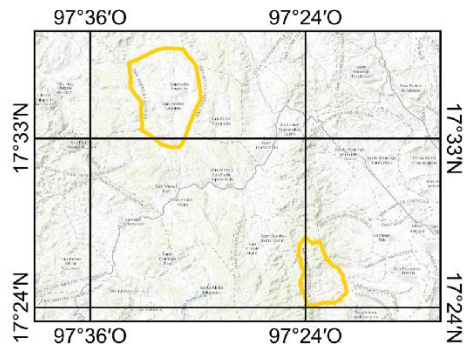
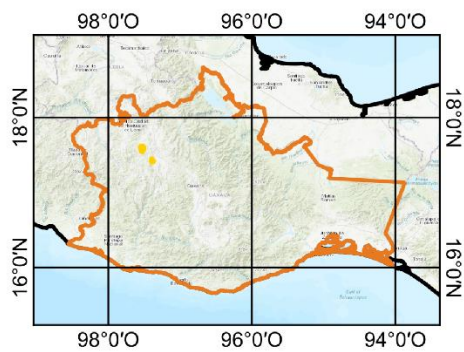
Figura 2. Sitio de muestreo en Santiago Nejapilla

4.1 Geología

El sitio de muestreo en San Andrés Lagunas, Oaxaca, se ubica sobre la Sierra Madre del Sur, su orografía está dada por los cerros: La Neblina, el cerro verde, el cerro de Agua, el Yucunubis y el Ñudino. Esta zona se encuentra constituido por calizas de plataforma marina carbonatada y con intercalaciones de dolomías y calizas arcillosas pertenecientes al periodo cuaternario (INEGI, 2010; Velasco, 2021).

El segundo sitio de muestreo en Santiago Nejapilla, Oaxaca, se encuentra sobre la falla Cieneguilla que se pone en contacto con la formación Yanhuitlán de composición andesítica en el Oligoceno tardío (entre 26 y 29 millones de años) con dirección al NE-SW. (Santamaría-Díaz *et al.*, 2008).

Área de estudio y puntos de muestreo en San Andrés Lagunas y Santiago Nezapilla



Símbología

- Límite Nacional
- Oaxaca
- Áreas de estudio
- Puntos de muestreo

Fecha de muestreo:
octubre y noviembre de 2021

SRC: WGS84

Figura 3. Sitios de estudio, San Andrés Lagunas y Santiago Nezapilla

4.2 Geoforma

De acuerdo con la FAO (2009), el sitio de muestreo en San Andrés Lagunas presenta una pendiente fuertemente inclinada (16 %), en la cumbre de la ladera con una forma de pendiente convexa. Por otra parte, en Santiago Nejapilla presenta una pendiente inclinada (8 %) en el pie de la ladera con una forma de pendiente cóncavo-convexo

4.3 Fisiografía

Los sitios de muestreo en San Andrés Lagunas y Santiago Nejapilla se ubican en la provincia de la Sierra Madre del Sur, en la Mixteca Alta, pertenecientes al distrito de Teposcolula. La Mixteca Alta cuenta con columnas geológicas desde el Pre-Cámbrico hasta el reciente. Se encuentra una secuencia Mesozoica constituida por rocas cretácicas marinas que fueron plegadas y fracturadas en eventos tectónicos posteriores a su primer plegamiento (Montes y López, 2005).

4.4 Vegetación y uso de suelo

La vegetación presente en el sitio de muestreo de San Andrés Lagunas está constituida por bosque de pino y pastizales. Se encuentran especies como el madroño, encino, pino, caahuate, ocote, y una alta densidad de pastizales. En la actualidad hay una cubierta vegetal de baja densidad en zonas erosionadas de lomerío y pie de cerro. La superficie agrícola tradicional se divide en 445 hectáreas de tierras de temporal óptimo y de humedad. Se realiza extracción de madera para realización de cabos para diferentes herramientas y madera para construcción de viviendas, cercos y corrales (INEGI, 2010; Ortiz, 2011).

En el segundo sitio de muestreo ubicado en Santiago Nejapilla, cerca del 60 % está cubierto por bosque. En las zonas más altas, la vegetación dominante es de encinares; en cambio, en las intermedias la vegetación dominante es de pino-encino con fragmentos de pino con árboles de mayor altura, cobertura y diámetro, lo que indica mayor tiempo de estancia de la vegetación. Las

más bajas se caracterizan por tener pequeñas áreas de pastizales y áreas abiertas destinadas a la agricultura temporal. La zona intermedia tiene uso forestal, pecuario y agrícola donde se cosecha avena, trigo y maíz (Cruz, 2008).

4.5 Clima

En San Andrés Lagunas cuenta con climas semicálido subhúmedo y templado subhúmedo, el promedio de precipitación anual es de 774 mm y el rango de temperatura de 16-20°C. Tiene lluvias en verano, de humedad media (80.01 %) y templado subhúmedo con lluvias en verano, menos húmedo (19.99 %) (INEGI, 2010).

En Santiago Nezapilla el clima predominante corresponde al templado subhúmedo (Cwo), tiene temperaturas medias entre 12 y 18°C, las temperaturas más altas registradas son de 27 a 29°C. Mientras que las temperaturas promedio anual es de 18°C. La precipitación promedio anual es de 800 a 900 mm, con marcada estacionalidad, entre los meses de mayo y octubre se presenta la mayor parte de la precipitación, mientras que, de noviembre a abril la precipitación es esporádica (Cruz, 2008).

4.6 Edafología

En San Andrés Lagunas existen diferentes tipos de suelos principalmente suelos arcillosos de color negro, calizos de color blanco y suelos arenosos, que son suelos amarillos rojizos y negros con alta pedregosidad (Ortiz, 2011). De acuerdo a INEGI, (2010), el 82.31 % del territorio está constituido por Somerirendzic Leptosol (Hyperhumic)es.

En Santiago Nezapilla el tipo de suelo predominante es el Luvisol crómico (Lc), estos suelos se caracterizan por ser de color rojo o amarillentos, de fertilidad moderada, de vocación forestal y pecuario (Cruz, 2008).

Los Somerirendzic Leptosol (Hyperhumic)es son suelos muy delgados sobre roca continua cerca de la superficie, principalmente se encuentra en zonas elevadas con fuerte pendiente topográfica. En presencia de material calcáreo se puede presentar un horizonte móllico (WRB, 2015). Los Somerirendzic Leptosol (Hyperhumic)es se encuentran en todas las zonas climáticas, particularmente las áreas muy erosionadas. Kubiěna (1970) mencionó que los horizontes enriquecidos con humus se forman principalmente en suelos que tienen presencia de materiales silicatados, ya que de lo contrario ocurriría una desintegración física de roca caliza o su disolución completa (Krasilnikov *et al.*, 2013).

Los cambisoles son suelos que se caracterizan por estar en una etapa transicional de desarrollo, presentan una incipiente diferenciación de horizontes que indica la evolución de un suelo joven hacia otro desarrollado. Se forman por lo regular en relieves ondulados y montañosos (Krasilnikov *et al.*, 2011).

Sitio	Coordenadas geográficas	Elevación	Pendiente	Posición en la pendiente	Forma de la pendiente	Cobertura vegetal	Tamaño de árboles	Condiciones climáticas	Geología	Material parental
San Andrés Lagunas	17° 32' 31.8'' N 96° 31' 53.1'' W	2,400 m s.n.m	16 %	Cumbre de la ladera	Convexo	60 % bosque 40 % pastizales	10 a 15 m de altura	PPA: 774 mm T: 16°-20°C	Roca caliza	Roca caliza
Santiago Nezapilla	17° 24' 16'' N 97° 23' 25'' W	2,589 m s.n.m	8 %	Pie de ladera	Cóncavo-convexo	90 % bosque 10 % arbustivas	20 a 25 m de altura	PPA: 800 a 900 mm T: 12°-18°C	Roca andesita	Coluvial y aluvial
PPA: Precipitación promedio anual T: Temperatura										

Cuadro 1. Características de sitios de estudio: San Andrés Lagunas y Santiago Nezapilla

5. Métodos

5.1 Diseño experimental y trabajo de campo

Se realizó un corte transversal de suelo en cada sitio hasta llegar a la roca madre o al material no intemperizado, se eligieron sitios donde la vegetación y suelo estén bien representados y con el menor grado de perturbación, se tomó el número de muestras correspondientes a los horizontes genéticos del perfil de abajo hacia arriba y se colectaron aproximadamente 2 kg, una vez obtenida la muestra se etiquetaron con los datos siguientes: lugar, número de perfil, profundidad o espesor de la capa y fecha de muestreo. La caracterización del sitio consiste en las siguientes determinaciones utilizando los métodos que se indican para cada caso: a) Descripción del sitio: Coordenadas geográficas, elevación, pendiente, cobertura vegetal, exposición de la ladera, vegetación dominante, tamaño de árboles, condiciones climáticas; b) Descripción del suelo e identificación: textura al tacto, densidad de raíces, forma, tamaño y abundancia de poros, (FAO, 2009), para su identificación se utilizó la Base referencial mundial del recurso suelo 2015 (WRB, 2015)

5.2 Trabajo de laboratorio

Las muestras de suelo se secaron a temperatura ambiente, posteriormente se tamizaron por malla < 2 mm. La determinación de los parámetros físicos y químicos fueron: capacidad de intercambio catiónico (CIC) (destilación de amonio) y bases intercambiables (método de acetato de amonio), carbono orgánico (método de Walkey y Black), nitrógeno (método de micro-Kjeldahl), pH y conductividad eléctrica por extracto de pasta de saturación. Los procedimientos se realizaron de acuerdo al Manual del ISRIC Technical Paper 9 (van Reeuwijk, 2002). La textura (método del hidrómetro de Bouyoucos), densidad real (método del picnómetro) y densidad aparente (método de la pipeta) (Ríos, 1996).

5.2.1 Capacidad de intercambio catiónico (CIC) y bases intercambiables

Se pesó 5 g de muestra de cada horizonte, se agregó 25 mL de etanol al 80 % en un tubo de percolación y se dejó reposar por 20 minutos, posteriormente se dejó percolar 100 mL en 2 h, se desechó el percolado y se agregó 100 mL de NH₄OAc 1 M, se ajustó la salida para percolar 100 mL en 4 h, se midió el Ca, Mg, K y Na en este percolado. El Ca y Mg se determinó por espectrofotometría de absorción atómica (AA) y el K y Na intercambiables por espectrofotometría de emisión de flama (EEF). Posteriormente se determinó la CIC por destilación con amonio, se agregó 20 mL de solución indicadora de ácido bórico y NaCl, posteriormente se añadió 10 mL de NaOH 1 M y se destiló 75 mL, por último, se tituló con HCl 0.05 M. Se calculó la CIC de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$CIC \left(\frac{cmol}{Kg} \text{ suelo} \right) = \frac{(a - b) \times M \times 100 \times fch}{s}$$

Donde *a* es el volumen requerido de HCl para la muestra; *b* es el volumen requerido para el blanco; *M* es la molaridad de HCl; *s* es el peso de la muestra y *fch* es el factor de corrección de humedad.

5.2.2 Carbono orgánico

Se pesó 1 g de suelo y se determinó el contenido de CO por oxidación con 10 mL de dicromato de potasio al 0.1667 M y 20 mL ácido sulfúrico concentrado, se agitó por 60 segundos y se reposó por 30 minutos, a continuación, se agregó 125 mL de agua destilada y 5 mL de ácido fosfórico concentrado. Se utilizó de indicador bario sulfonato de difenilamina al 0.16 %. Se calculó el porcentaje con la siguiente fórmula:

$$\% CO = M \frac{V1 - V2}{s} \times 0.39 \times fch$$

Donde *M* es la molaridad del Dicromato de potasio; *V1* y *V2* el volumen de titulación; *s* es el peso de la muestra y *fch* es el factor de corrección de humedad.

5.2.3 Nitrógeno

Se pesó 1 g de suelo cernido en un tamiz de 0.25 mm, se agregó 2.5 mL de mezcla digestora y 3 alícuotas de 1 mL de peróxido de hidrógeno. Para la destilación se agregó 20 mL de la solución indicadora-ácido bórico, se añadió al tubo de digestión 20 mL de NaOH al 30 % y se destiló. Por último, se tituló con HCl 0.01 M. Se calculó el porcentaje de Nitrógeno de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\% N = \frac{a - b}{S} \times M \times 1.4 \times fch$$

Donde a son los mililitros requeridos de HCl en la titulación de la muestra; b son los mililitros requeridos en la titulación del blanco; M es la molaridad de HCl; 1.4 es el porcentaje que representa el peso atómico del nitrógeno y fch es el factor de corrección de humedad

5.2.4 pH y Conductividad eléctrica

Se pesó 200 g de suelo de cada horizonte y se agregó agua destilada hasta la saturación de las muestras. Se dejaron reposar por 24 h. Posteriormente, se transfirieron a embudos Buchner aplicando vacío para colectar el filtrado. Se midieron pH y conductividad eléctrica de este extracto.

5.2.5 Textura

Se pesó 60 g de suelo, se añadió agua hasta capacidad de campo, se añadió 20 mL de H₂O₂ 10 % y se calentó a baño maría hasta sequedad. Se añadieron 50 g a un agitador mecánico, se añadió 5 mL de soluciones dispersantes y agua. Se transfirió a una probeta de 1000 mL. Se realizaron mediciones con el densímetro a los 40 segundos y a las 2 horas. El porcentaje de arena, limo y arcilla se realizó de acuerdo a las siguientes fórmulas:

$$\% \text{ limo} + \% \text{ arcilla} = \frac{\text{densidad } 1 + (T1 - T0) \times 0.36}{g \text{ de la muestra}} \times 100$$

$$\% \text{ arcilla} = \frac{\text{densidad } 2 + (T2 - T0) \times 0.36}{g \text{ de la muestra}} \times 100$$

$$\% \text{ limo} = x - a = b$$

$$\% \text{ arena} = 100 - x = c$$

Donde T1 es la temperatura inicial; T0 es la temperatura en la que está calibrado el Bouyoucos y la T2 es la temperatura final.

5.2.6 Densidad real

Se pesó 5 g de suelo y se añadieron a un picnómetro, se añadieron 10 mL de agua destilada, se agitó durante 30 minutos y se llenó con agua hasta el aforo. Posteriormente se pesó el picnómetro más agua y el suelo. Para el cálculo de la densidad real se utilizó la siguiente fórmula:

$$DR = \frac{C - A}{((C - A) + (B - A)) - (D - A)}$$

Donde: A es el peso del picnómetro, B es el peso del picnómetro más agua, C es el peso del picnómetro más el suelo y D, el peso del picnómetro más suelo más agua.

5.2.7 Densidad aparente

Se pesó 10 g de suelo previamente seco en horno, por otra parte, se pesó una probeta y se añadieron las muestras de suelo, se golpearon 10 veces sobre el lienzo y se agregó suelo hasta 10 mL, por último, se pesó la probeta más el suelo. Para el cálculo de la densidad aparente se utilizó la siguiente fórmula:

$$DA = \frac{\text{peso de la probeta con el suelo} - \text{peso de la probeta}}{\text{volumen total}}$$

5.3 Identificación de suelos

Los suelos se identificaron utilizando la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo de la FAO (2015).

5.4 Análisis estadístico

Se realizó un análisis de correlación de Pearson para encontrar aquellas variables más relacionadas con la cantidad de carbono, posteriormente se realizaron modelos de regresión lineal múltiple para observar cómo influyó cada propiedad en la cantidad del carbono, se utilizó el software R 4.3.2 y el software IBM SPSS.

6. Resultados

6.1.1 Procesos edafogénicos y clasificación del suelo

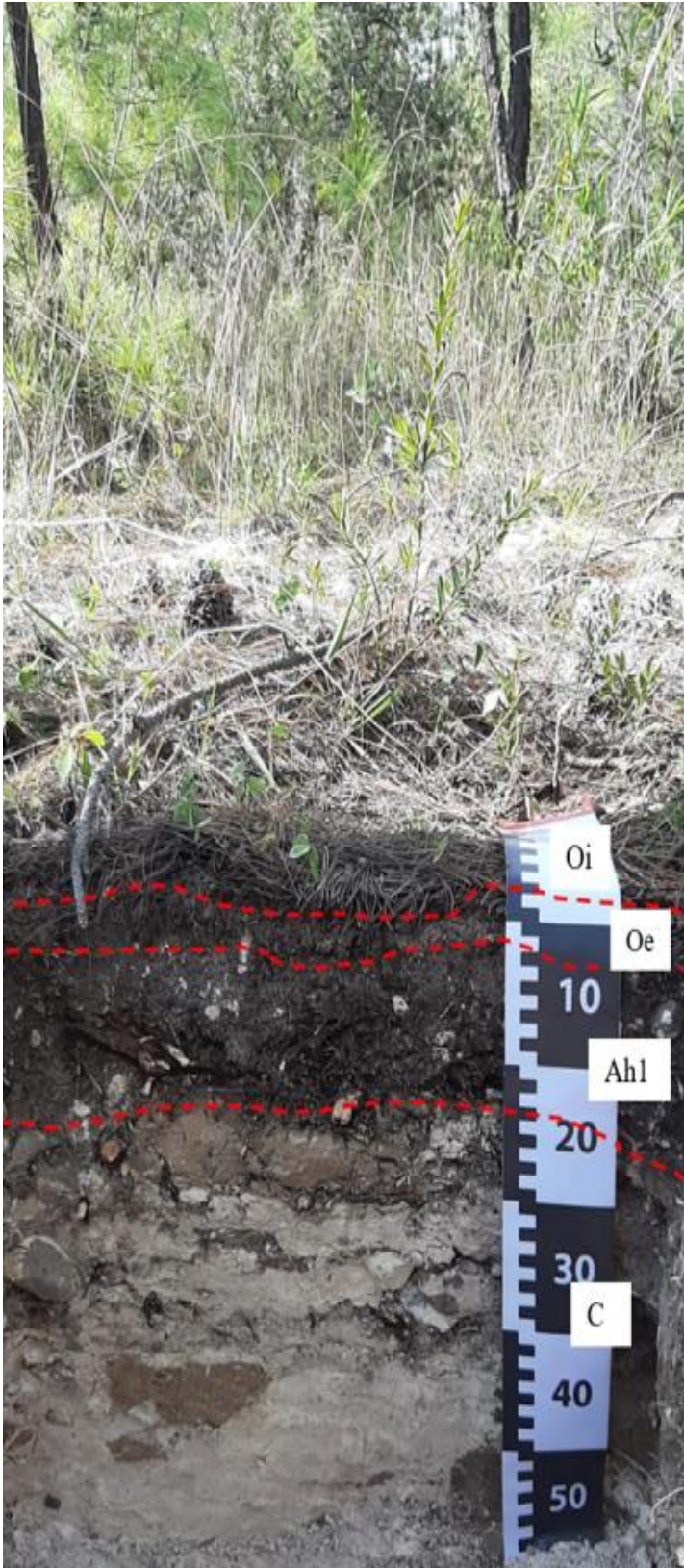
Se obtuvo la descripción y clasificación de dos suelos evaluados en San Andrés Lagunas y Santiago Nezapilla.



Figura 4a. Perfil de suelo descrito en San Andrés Lagunas: a) Somerirendzic Leptosol (Hyperhumic)



Figura 4b. Perfil de suelo descrito en Santiago Nezapilla: b) Eutric Chromic Andic Cambisol (Colluvic, Loamic, Magnesian, Profundihumic)



Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
Oi	0/3	Materia orgánica ligeramente descompuesta, se pueden identificar acículas y ramas
Oe	3/4	Materia orgánica moderadamente descompuesta, presenta dos tercios de restos visibles.
Ah	3/4-15	La transición con C es suave y clara, la textura es arenoso francoso, muy pedregoso (20-50 %) con rocas medias (5-10 cm) subangulares, cuando húmedo es friable y muy húmedo no es pegajoso ni plástico, no se presentan cutanes, nódulos, concreciones ni estratos endurecidos. Porosidad numerosa con poros micro y muy finos de hasta 1 mm de diámetro, con orientación horizontal y oblicua de forma intersticial y tubular. La permeabilidad es rápida, se presentan raíces comunes (10-100 cm ²) de finas a muy gruesas, el suelo está drenado. Estructura bloque subangular

Figura 5. Descripción morfológica de campo en San Andrés Lagunas de Somerirendzic Leptosol (Hyperhumic).

Hor.	Prof. (cm)	Descripción
Oi	0/9	Materia orgánica ligeramente descompuesta, se pueden identificar acículas y ramas
Ah	9/14	La transición a BA es ondulada gradual, el suelo es húmedo. Textura arcillo limosa, con pedregosidad del 10 %, rocas de hasta 2 cm de diámetro angulares, en consistencia húmeda es firme, ligeramente adherente y plástico, no se presentan cutánes, nódulos, concreciones ni estratos endurecidos. La porosidad está integrada por micro y macro poros de hasta 20 mm siendo comunes por cada decímetro de forma intersticial. Permeabilidad rápida, las raíces son de muy finas a gruesas de hasta > 5 mm de diámetro. La estructura de este horizonte es granular y en bloques, con un grado moderado de muy fino hasta muy grueso (> 10 mm).
BA	9/14-39/44	La transición a B es suave con una distinción clara, la textura es franco arcillosa, sin presencia de pedregosidad, en consistencia húmedo es firme, ligeramente adherente y plástico, no presenta cutánes, nódulos, concreciones ni estratos endurecidos. La porosidad está integrada por micro y macro poros de hasta 5mm de diámetro, siendo muy poco abundantes. Permeabilidad rápida, las raíces son de muy finas hasta gruesas de hasta > 5 mm de diámetro. Presenta una estructura en bloques con un grado moderado de muy fino hasta muy grueso (> 10 mm).
Bt	39/44-57/65	La transición a C es ondulada con una distinción clara, la textura es arcillo limosa, con una pedregosidad del 5 % con presencia de grava gruesa de hasta 60 mm de diámetro con forma angular, de consistencia en húmedo muy firme, ligeramente adherente y muy plástico, no se presentan cutánes, nódulos, concreciones ni estratos endurecidos. Porosidad constituida por microporos de hasta 2 mm de diámetro siendo estos poco abundantes. Permeabilidad rápida, las raíces son de muy finas a gruesas de hasta > 5 mm de diámetro. Presenta una estructura en bloques y granular, con un grado moderado de muy fino hasta muy grueso (> 10 mm).
Btw	57/65-106/110	La textura es arcillosa, sin presencia de pedregosidad, de consistencia en húmedo firme, adherente y ligeramente plástica, no presenta cutánes, nódulos, concreciones ni estratos endurecidos. La porosidad está constituida por microporos de hasta 2 mm, siendo estos comunes. La presencia de raíces es de 5 mm de diámetro. La estructura es granular, con un grado moderado de muy fino hasta muy grueso (> 10 mm).

Figura 6. Descripción morfológica de campo en Santiago Nejapilla de un Eutric Chromic Andic Cambisol (Colluvic, Loamic, Magnesic, Profundihumic)

El suelo descrito en San Andrés Lagunas (Figura 4a) se encuentra en la cumbre de la ladera a una altitud de 2400 m s.n.m, con orientación al Suroeste y una pendiente de 16 %. El perfil se encuentra ubicado en un sitio donador, presenta una rápida permeabilidad y el material parental es de roca caliza. El sitio tiene una cobertura total del 60 % con tamaño de árboles de 10-15m y presencia de herbáceas. Presenta en sus horizontes genéticos Ah una estructura granular y migajosa, un contenido de COS de 12.79 %, una saturación de bases del 100 % y un espesor total de 15 cm (Cuadro 2) por lo que se designó como Grupo Referencial de Suelo (GSR) Somerirendzic Leptosol (Hyperhumic). Este perfil tiene como material parental roca caliza que yace en los primeros 15 cm como roca continua, se designa al epipedón como un horizonte móllico somero (somerirendzic). Se observan procesos biogénicos que se denotan en una estructura granular fina debido a la alta actividad de las raíces que redondean y forman los agregados. El suelo se identificó como un Somerirendzic Leptosol (Hyperhumic), de acuerdo con la WRB (2015).

El suelo descrito en Santiago Nezapilla (Figura 4b) está ubicado en el pie de la ladera a una altitud de 2589 m s.n.m, con orientación al este y una pendiente del 8 %. El perfil se encuentra ubicado en un sitio receptor, presenta una permeabilidad rápida y un material parental de andesita. El sitio presenta una cobertura total del 80 % con tamaño de árboles de 20-25 m.

El horizonte genético Btw tiene una textura arcillosa, ausencia de pedregosidad y muestra una alteración edafogenética, ya que el contenido de arcilla es mayor de 4 % que el horizonte Bt, por lo que se designó como un horizonte cámbico. En los horizontes genéticos Ah y BA presenta una estructura migajosa-granular y migajosa respectivamente, un contenido de COS de 4.38 % y 2.14 % y una saturación de 100 %, por lo que el GRS es Cambisol. A lo largo del perfil encontramos en la mayoría una textura franca arcillosa, por lo que se designa el calificador Loamic. Por otra parte, la relación de Ca a Mg intercambiables < 1 y el alto contenido de carbono > 5 % a lo largo del

perfil se añaden los calificadores Magnesianic e Profundihumic, respectivamente. El suelo se identificó como un Eutric Chromic Andic Cambisol (Colluvic, Loamic, Magnesianic, Profundihumic) por la WRB (2015).

6.2 Carbono orgánico y su relación con propiedades físicas y químicas del suelo

El contenido de carbono orgánico a lo largo del perfil edáfico permitió obtener una evidencia de los procesos edafogénicos derivados de la interacción de factores bióticos y abióticos.

6.2.1 Carbono orgánico y la profundidad

Como se puede observar en el Cuadro 4 existe una correlación negativa entre el carbono y la profundidad ($r = -0.582$, $p = 0.302$). En el suelo Somerirendzic Leptosol (Hyperhumic), el horizonte Ah presenta 128 g kg^{-1} de CO, esta cantidad de materia orgánica es considerada alta. En el Eutric Cambisol, de acuerdo a los contenidos de materia orgánica, presenta niveles bajos, ya que el horizonte Ah tiene 43.8 g kg^{-1} de COS y el horizonte 2Btw 15 g kg^{-1} , sin embargo, se puede encontrar un aumento en el horizonte 2Bt de 25.6 g kg^{-1} a comparación del horizonte BA con 21.4 g kg^{-1} el cual se encuentra a menor profundidad (Cuadro 1 y Figura 7a).

Como se observa, el carbono tiende a disminuir conforme la profundidad aumenta. También se observa una diferencia significativa de contenido de carbono en los epipedones de ambos suelos, siendo así, el Somerirendzic Leptosol (Hyperhumic) el que presenta mayor contenido a comparación del Cambisol.

Hor	Profundidad cm	pH	CE dS m-1	Color		Estructura		DA g cm ⁻³	DR g cm ⁻³	Material parental
				Seco	Húmedo	Tipo	Tamaño			
Somerirendzic Leptosol (Hyperhumic)										
Ah	3/4-15	7.88	0.8	2.5Y 4/1	2.5Y 2.5/1	M y G	F	0.7	2.19	Roca caliza
Eutric Chromic Andic Cambisol (Colluvic, Loamic, Magnesian, Profundihumic)										
Ah	9/14	7.51	0.45	10YR 4/3	10YR 2/2	M	F	1	2.71	Roca Andesita
BA	9/14-39/44	7.2	0.12	10YR 3/3	10YR 2/2	BSA	M	1.1	2.34	
Bt	39/44-57/65	7.5	0.42	10YR 3/4	10YR 2.5/2	BSA	M y G	1.1	2.4	
Btw	57/65-106/110	7.54	0.6	10YR 4/4	7.5YR 2.5/2	BA y BSA	MG	1.1	2.33	
<p>G: granular; M: migajosa; BA: Bloques angulares; BSA: bloques subangulares F: finos; M: medios; G: gruesos; MG: muy gruesos; MOD: moderado</p>										

Cuadro 2. Propiedades morfológicas y físicas de Somerirendzic Leptosol (Hyperhumic) y Cambisol

Hor	Profundidad (cm)	CO	N	Textura				CIC	Bases intercambiables					Saturación de bases
		g kg ⁻¹	g kg ⁻¹	A	L	R	Clase		Ca	Mg	Ca/Mg	K	Na	%
		%			Cmol (+) kg ⁻¹	Cmol (+) kg ⁻¹								
Somerirendzic Leptosol (Hyperhumic)														
Ah	3/4-15	128	10	38.6	34.71	26.29	F	47.52	49.98	3.32	15.05	12.81	0.53	100
Eutric Chromic Andic Cambisol (Colluvic, Loamic, Magnesic, Profundihumic)														
Ah	9/14	43.8	3.7	38.6	40	21.4	F	33.88	9.8	23.78	0.41	12.81	0.49	100
BA	9/14-39/44	21.4	0.3	33	32	35	FR	20.24	7.19	20.21	0.35	0.54	0.53	100
Bt	39/44-57/65	25.6	0.4	26.4	40	33.6	FR	31.9	11	24.07	0.46	0.51	0.49	100
Btw	57/65-106/110	15	0.4	22.8	36	41.2	R	30.8	6	22.88	0.26	0.43	0.47	96.69
FR: franco-arcillosa; F: Franco; R: Arcillosa														

Cuadro 3. Propiedades químicas de Somerirendzic Leptosol (Hyperhumic) y Cambisol

6.2.2 Carbono orgánico y densidad real

De acuerdo con la figura 7b, se observa que en Somerirendzic Leptosol (Hyperhumic) presenta una menor densidad real (2.19 g cm^{-3}) y un mayor contenido de carbono orgánico, por el contrario, en el Eutric Cambisol, quien presenta un menor contenido de CO y una mayor densidad real (2.71 g cm^{-3}), presentando una correlación negativa ($r = -0.392$, $p = 0.513$), por lo cual, mientras más contenido de carbono orgánico haya, menor es la densidad real.

6.2.3 Carbono orgánico y la densidad aparente

De acuerdo con la figura 7c, en el Somerirendzic Leptosol (Hyperhumic) la densidad aparente es de 0.7 g cm^{-3} , la cual se asocia con suelos orgánicos, por otra parte, en el Eutric Cambisol el horizonte Ah presenta una densidad de 1 g cm^{-3} y aumenta ligeramente manteniéndose en los siguientes horizontes con 1.1 g cm^{-3} , esta densidad es asociada con suelos arcillosos. Se puede observar que en el horizonte superficial presenta mayor contenido de COS y en los horizontes subyacentes, disminuye sin una diferencia notable, por lo que la correlación existente entre estas dos propiedades es negativa inversa ($r = -0.962$, $p = 0.002$), ya que cuando el contenido de carbono aumenta, la densidad aparente tiende a disminuir, esto se puede observar comparando ambos suelos, el Somerirendzic Leptosol (Hyperhumic) presenta una mayor cantidad de carbono y una menor densidad aparente. Por lo que en suelos con alto contenido de materia orgánica disminuye el valor de densidad aparente.

6.2.4. Carbono orgánico y arcilla

De acuerdo a la figura 6, se observa una correlación inversa entre el carbono y la profundidad ($r = -0.577$, $p = 0.308$). En el suelo Somerirendzic Leptosol (Hyperhumic), el horizonte Ah con un mayor contenido de C.O presenta 26.29 % de arcilla, una relación franca en cuanto a textura en todo su espesor. En Eutric Cambisol se puede observar el incremento de arcilla conforme aumenta

la profundidad, sin embargo, su cantidad de carbono orgánico disminuye, iniciando con 43.8 g kg⁻¹ y 21.4 % de arcilla, terminando con 15 g kg⁻¹ de C.O y 41.2 % de arcilla (Cuadro 2 y Figura 7b).

Como se observa, el carbono tiende a disminuir conforme la arcilla aumenta, ya que esta se incrementa conforme la profundidad es mayor. También se observa una diferencia de contenido de arcilla entre ambos suelos, siendo el Eutric Cambisol quien presente mayor porcentaje a lo largo de sus horizontes.

6.2.5 Carbono orgánico y limo

De acuerdo al Cuadro 4, se observa una correlación entre el carbono orgánico y el limo negativa ($r = -0.154$, $p = 0.804$). En el suelo Somerirendzic Leptosol (Hyperhumic) se observa la presencia del 34.71 % de limo, correspondiendo a una textura franca (Cuadro 1). Por el contrario, en el Eutric Cambisol se observa que, en el epipedón presenta un mayor porcentaje de limo (40 %) y un mayor contenido de materia orgánica (43.8 %), por el contrario, en los horizontes suprayacentes este tiende a disminuir, ya que se ve relacionado con el aumento de la arcilla (Figura 7d).

6.2.6 Carbono orgánico y arena

En la figura 7c se puede observar que el perfil Somerirendzic Leptosol (Hyperhumic) presenta un mayor contenido de arena (38.6 %) y carbono orgánico (128 g kg⁻¹) a comparación del Eutric Cambisol, quien presenta un porcentaje de arena igual (38.6 %) sin embargo, un menor contenido de carbono orgánico, en donde se observa una correlación positiva ($r = 0.676$, $p = 0.219$).

6.2.7 Contenido de carbono y la relación con el pH

El suelo Somerirendzic Leptosol (Hyperhumic) presenta niveles de pH de 7.88, el cual se considera medianamente alcalinos. Por otra parte, en el Cambisol, el pH varía de 7.2 y 7.54 (Horizontes BA y 2Btw), que se consideran entre neutro y medianamente alcalinos (Cuadro 1)

Por otra parte, se puede observar una correlación positiva entre el contenido de carbono orgánico y el pH ($r = 0.882$, $p = 0.08$), ya que ambas propiedades aumentan. El suelo que presenta mayor pH es el mismo que tiene mayor contenido de COS, el Somerirendzic Leptosol (Hyperhumic). En el horizonte genético Ah se observa un contenido de carbono de 128 g kg^{-1} y pH de 7.88. En el Cambisol se observa una ligera variación de pH conforme al contenido de CO. Por lo que en suelos con pH medianamente alcalinos favorece la presencia de carbono en el suelo.

6.2.8 Contenido de carbono orgánico y la relación con la conductividad eléctrica

El suelo Somerirendzic Leptosol (Hyperhumic) presenta niveles de conductividad eléctrica (CE) de 0.8 dS m^{-1} , el cual se considera no salino. Por otra parte, en el Eutric Cambisol varía de 0.45 dS m^{-1} y 0.6 dS m^{-1} (Horizontes Ah y 2Btw), que se consideran de igual manera, no salinos. (Cuadro 1)

Por otra parte, se puede observar una correlación positiva entre el contenido de carbono orgánico y el pH ($r = 0.699$, $p = 0.08$), ya que ambas propiedades aumentan. El suelo que presenta mayor CE es el mismo que tiene mayor contenido de COS, el Somerirendzic Leptosol (Hyperhumic) (Figura 7h).

6.2.9 Contenido de carbono orgánico y la relación con la capacidad de intercambio catiónico (CIC)

En el suelo Somerirendzic Leptosol (Hyperhumic), en el horizonte Ah presenta una CIC de 47.52 cmol (+) kg⁻¹ este valor corresponde a una clase alta. Por otra parte, en el Cambisol en Ah y 2Bt presentan los niveles más altos de CIC, 33.88 cmol (+) kg⁻¹ y 31.9 cmol (+) kg⁻¹, respectivamente, el valor más bajo es del horizonte BA con 20.24 cmol (+) kg⁻¹, estos valores corresponden a una clase media a alta (Cuadro 2).

Existe una relación positiva entre estas dos propiedades ($r = 0.838$, $p = 0.001$), se puede observar en la Figura 7i), el Somerirendzic Leptosol (Hyperhumic) es el que suelo que presenta mayor contenido de carbono orgánico y capacidad de intercambio catiónico. En el caso del Cambisol pasa lo mismo, los horizontes que contienen mayor CO es el mismo que tiene mayor CIC. Por lo que en presencia de alto carbono aumenta la capacidad de intercambio catiónico en el suelo.

6.2.10 Contenido de carbono orgánico y la relación con el nitrógeno

En el suelo Somerirendzic Leptosol (Hyperhumic), el horizonte Ah presenta un contenido de nitrógeno de 10 g kg⁻¹ el cual se denomina como una cantidad baja en el suelo. Por otra parte, el Cambisol presenta cantidades menores de hasta 0.3 g kg⁻¹, por lo que se considera una cantidad muy baja (Cuadro 2).

Existe una correlación positiva entre el carbono orgánico y nitrógeno ($r = 0.987$, $p = 0.001$) (Figura 7j), en donde se observa que el mayor valor de CO tiene mayor contenido de nitrógeno. Para ambos suelos el horizonte superficial es el que tiene mayor cantidad de estos elementos, destacando en el Somerirendzic Leptosol (Hyperhumic), y conforme la profundidad aumenta va disminuyendo el carbono y a su vez, el nitrógeno. Por lo que la presencia de nitrógeno aumenta la cantidad de materia orgánica en el suelo.

6.2.11 Contenido de carbono orgánico y la relación con magnesio

En el suelo Somerirendzic Leptosol (Hyperhumic), en el horizonte Ah presenta un valor de 3.32 cmol (+) kg⁻¹ el cual es considerado alto. Por el contrario, en el Cambisol los niveles más altos son de los horizontes 2Bt y Ah con 24.07 cmol (+) kg⁻¹ y 23.78 cmol (+) kg⁻¹, respectivamente, los cuales son considerados muy altos.

Existe una correlación negativa significativa con el contenido de carbono orgánico y la relación con el magnesio ($r = -0.941$, $p = 0.016$), se puede observar en la Figura 7k) que el Somerirendzic Leptosol (Hyperhumic) es el suelo con menor contenido de este elemento y tiene mayor cantidad de CO a comparación del Cambisol, el cual tiene muy alta cantidad de Mg pero bajos niveles de carbono, por lo que la presencia del magnesio disminuye la cantidad de carbono orgánico en el suelo.

6.2.12 Contenido de carbono orgánico y la relación con el sodio

El suelo Somerirendzic Leptosol (Hyperhumic) presenta niveles sodio de 0.53 cmol(+) kg⁻¹. Por otra parte, en el Cambisol, el sodio varía de 0.53 cmol(+) kg⁻¹ y 0.47 cmol(+) kg⁻¹ (Horizontes BA y 2Btw) (Cuadro 1).

Por otra parte, se puede observar una correlación positiva no significativa entre el contenido de carbono orgánico y el sodio ($r = 0.573$, $p = 0.312$), ya que ambas propiedades aumentan (Figura 7l).

6.2.13 Contenido de carbono orgánico y la relación con el potasio

En el suelo Somerirendzic Leptosol (Hyperhumic), en el horizonte Ah presenta potasio en 12.81 cmol (+) kg⁻¹ este valor corresponde a un valor alto. Por otra parte, en el Eutric Cambisol en el

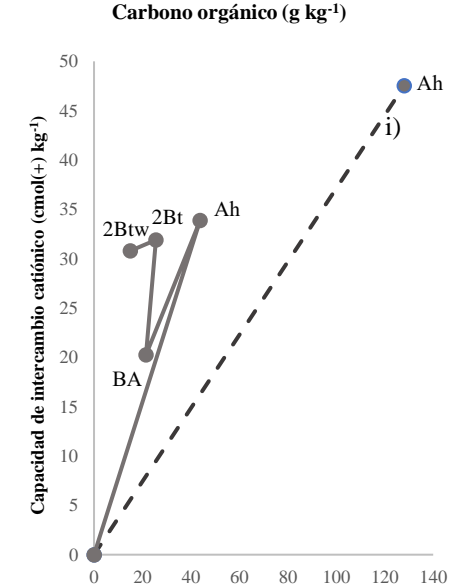
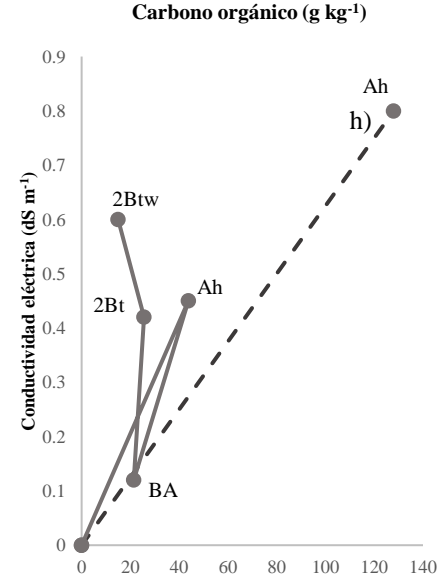
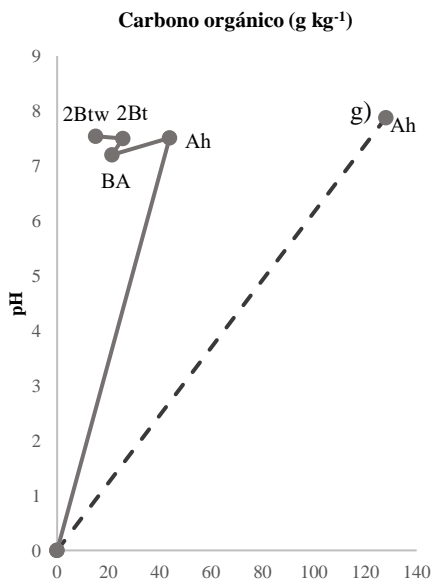
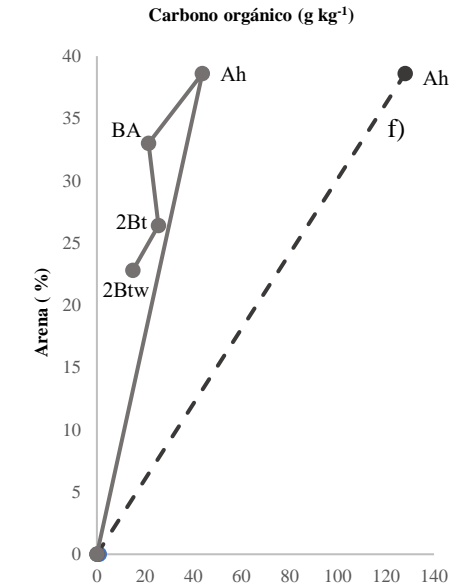
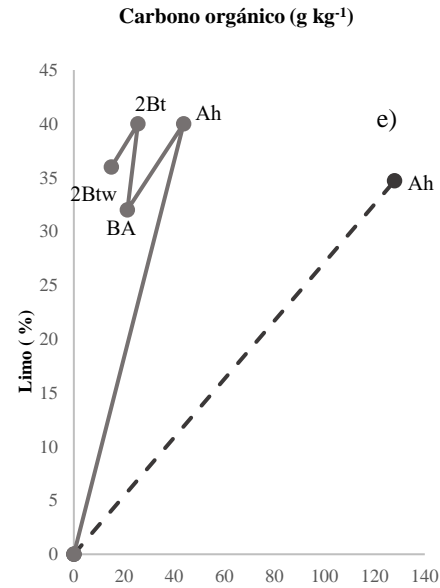
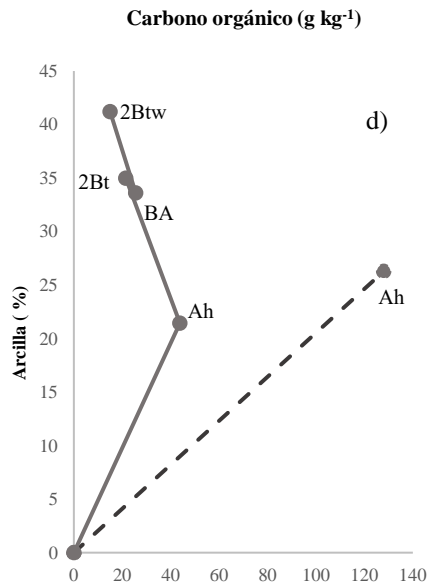
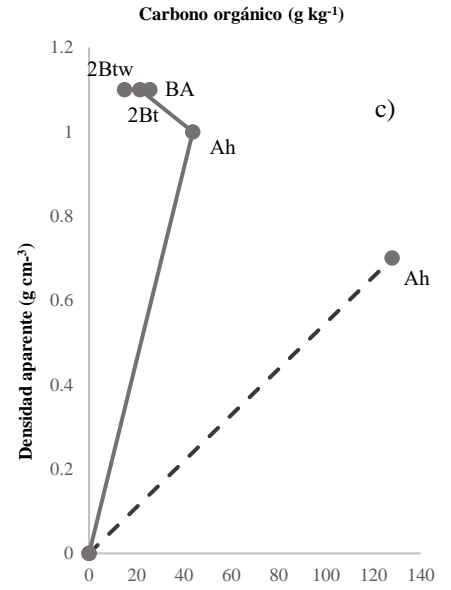
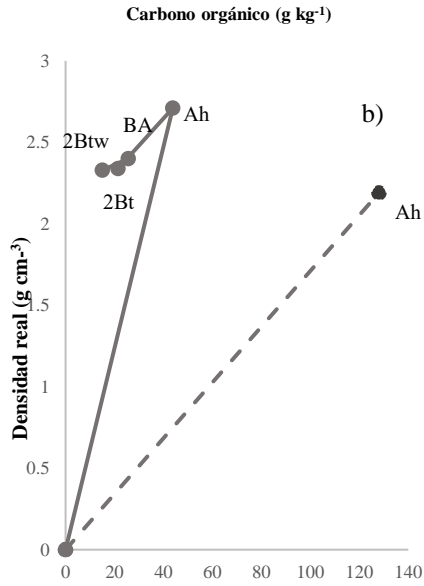
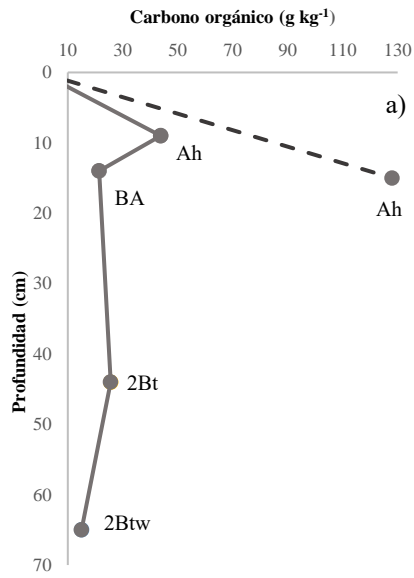
epipedón presenta el nivel más alto, 12.81 cmol (+) kg⁻¹, el valor más bajo es del horizonte 2Btw con 0.43 cmol (+) kg⁻¹, estos valores corresponden a valores medios y altos (Cuadro 2).

Existe una relación positiva entre estas dos propiedades ($r = 0.016$, $p = 0.979$), se puede observar en la figura 7m), el Somerirendzic Leptosol (Hyperhumic) es el que suelo que presenta mayor contenido de carbono orgánico y potasio. En el caso del Cambisol pasa lo mismo, los horizontes que contienen mayor CO es el mismo que tiene mayor potasio.

6.2.14 Contenido de carbono orgánico y la relación con calcio

En el suelo Somerirendzic Leptosol (Hyperhumic), en el horizonte Ah presenta una cantidad de calcio de 49.98 cmol (+) kg⁻¹, este valor corresponde a un alto contenido. Por otra parte, el suelo Cambisol, en los horizontes 2Bt y Ah tiene el mayor contenido de Ca respecto a los demás con valores de 11 cmol (+) kg⁻¹ y 9.8 cmol (+) kg⁻¹, respectivamente, estos valores corresponden a un valor medio (Cuadro 2).

Existe una correlación positiva significativa entre el carbono orgánico y el calcio ($r = 0.983$, $p = 0.002$, se puede observar en la Figura 7n) que el Somerirendzic Leptosol (Hyperhumic) es el suelo que presenta mayor contenido de Ca y el mismo que presenta mayor contenido de COS en sus dos horizontes. Al contrario del Cambisol, el cual tiene valores significativamente bajos con respecto al Somerirendzic Leptosol (Hyperhumic), por lo que la presencia de calcio favorece la presencia del carbono orgánico en el suelo.



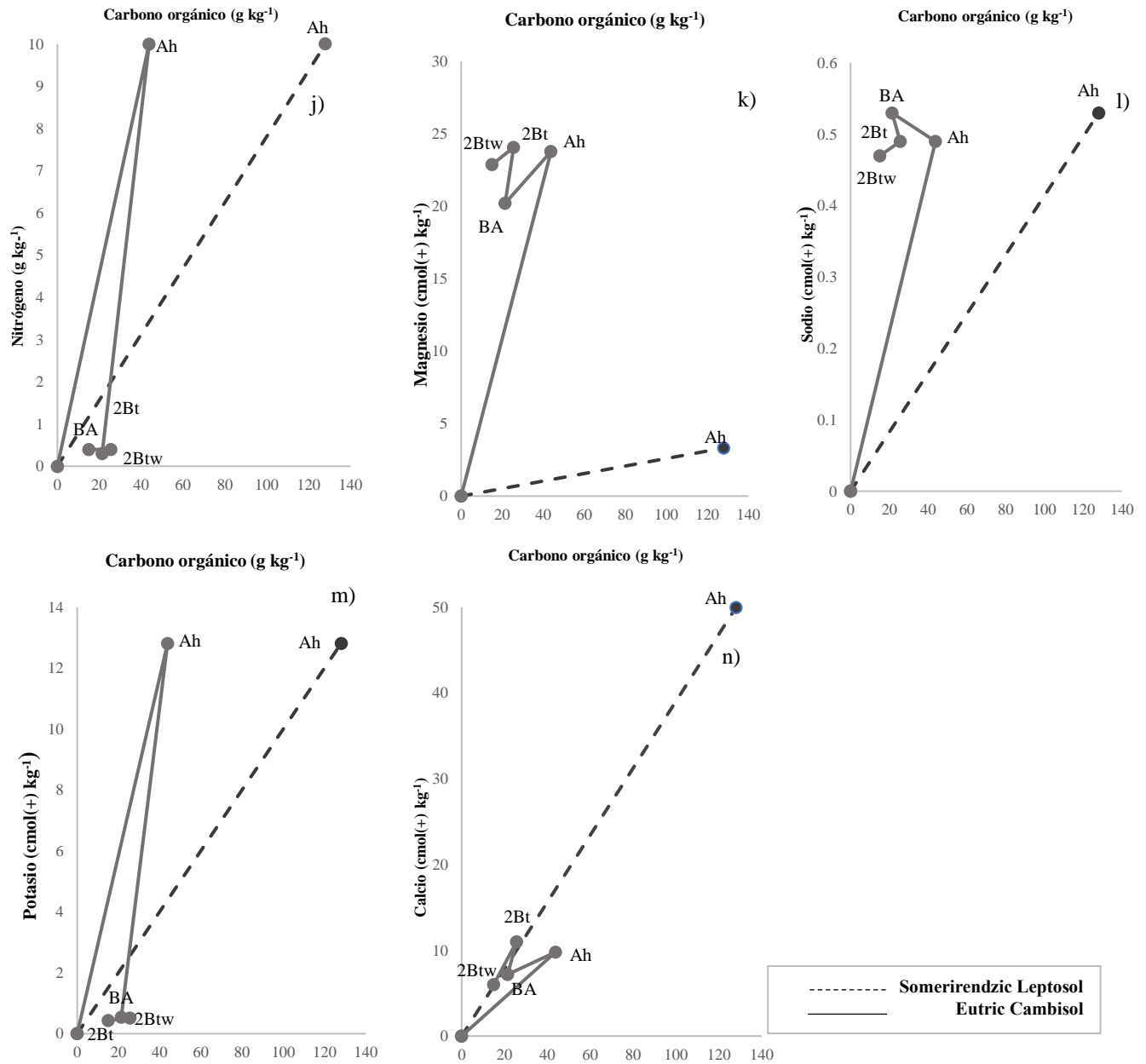


Figura 7. Gráficas de carbono y propiedades físicas y químicas del suelo

: a) Relación del carbono y profundidad del suelo; b) Relación del carbono y densidad real; c) Relación del carbono y densidad aparente; d) Relación del carbono y arcilla; e) Relación del carbono y limo; f) Relación del carbono y arena; g) Relación del carbono y pH; h) Relación del carbono y conductividad eléctrica; i) Relación del carbono y capacidad de intercambio catiónico; j) Relación del carbono y nitrógeno; k) Relación del carbono y magnesio; l) Relación del carbono y sodio; m) Relación del carbono y potasio; n) Relación del carbono y calcio.

6.3 Análisis estadísticos

6.3.1 Correlación de Pearson

Se integraron los datos de manera general para conocer las relaciones que existen en ambos suelos, (Cuadro 3), donde se pueden observar que las variables ($p < 0.05$) son: calcio, capacidad de intercambio catiónico, densidad aparente, magnesio y nitrógeno.

Variable	R ²	p-valor
Profundidad	-0.582	0.302
Densidad real	-0.392	0.513
Densidad aparente	-0.960	0.002
Arcilla	-0.577	0.308
Arena	0.676	0.209
Limo	-0.154	0.804
pH	0.825	0.08
Conductividad eléctrica	0.699	0.189
Capacidad de intercambio catiónico	0.838	0.001
Nitrógeno	0.987	0.001
Magnesio	-0.941	0.016
Sodio	0.573	0.312
Potasio	0.016	0.979
Calcio	0.983	0.002

Cuadro 4. Correlación de Pearson entre carbono orgánico y variables del suelo

6.3.2 Modelos de regresión lineal

Se realizaron modelos de regresión lineal múltiple, en el cuadro 5 se observa que los modelos que mejor se ajustan a los datos (su R ajustada es cercana a 1, reflejando un buen ajuste al modelo) las partículas pertenecientes a textura (arcilla, limo y arena) en donde por cada unidad que aumente de arcilla disminuirá un valor de -234.31 unidades en carbono orgánico, debido a que se observó un

incremento de arcilla conforme aumenta la profundidad disminuyendo la presencia de CO. Por otra parte, por cada unidad que incremente de éste, el carbono aumentará 11.48 unidades observándose una relación directa debido a la relación C/N que existe. Por último, por cada unidad de densidad aparente que aumente, disminuirá -265.663 unidades de carbono, ya que valores altos de DA indica menor presencia de CO. De acuerdo a lo anterior, estas propiedades están influenciadas directamente por la cantidad de carbono que esté presente en el suelo y son estadísticamente significativas.

Número de modelo	Modelo	Coefficiente de regresión	R ajustada	Error estándar	Pr (> t)
1	Intercepto	23351.057	0.999	374.733	0.0102
	Arcilla	-234.310		3.753	0.0102
	Limo	-232.580		3.707	0.0101
	Arena	-232.907		3.801	0.0104
2	Intercepto	7.724	0.956	13.705	0.6298
	Profundidad	0.233		0.450	0.6558
	Nitrógeno	11.483		1.498	0.0166
3	Intercepto	-7.345	0.882	110.339	0.958
	Capacidad de intercambio catiónico	0.489		2.612	0.882
	Magnesio	0.16		3.666	0.998
	Calcio	2.246		5.785	0.650
4	Intercepto	-485.33	-0.302	514.172	0.445
	Potasio	1.263		5.009	0.824
	Sodio	1052.180		1016.037	0.409
5	Intercepto	-3432.555	0.715	-1501.108	0.150
	Conductividad eléctrica	-320.653		204.187	0.257
	pH	482.672		212.004	0.151
6	Intercepto	327.854	0.9856	34.835	0.011

	Densidad real	-6.429		15.500	0.718
	Densidad aparente	-265.663		17.381	0.004

Cuadro 5. Modelos de regresión lineal relacionando carbono orgánico con cada variable

7. Discusión

7.1 Procesos edafogénicos y clasificación de suelos

La formación de los suelos pasa por factores formadores que determinan la edafogénesis y su evolución, los cuales son el clima, los organismos, el relieve, el material parental y el tiempo, cada uno puede influir más que otro dependiendo el suelo (Navarro y Mataix, 2014).

El suelo situado en San Andrés Lagunas denominado Somerirendzic Leptosol (Hyperhumic), es un suelo con una escasa profundidad y relativamente joven, en el cual el principal factor de formación es el material parental que está presente en los primeros 15 cm de profundidad, por otra parte, comienza a formar un horizonte móllico en Ah, este se ve favorecido con el contacto del material parental que es roca caliza, ya que proporciona un gran contenido de bases intercambiables, principalmente Ca, que favorece a la formación de complejos órgano-mineral que estabilizan el carbono orgánico. La vegetación es otro factor importante en este suelo y se relaciona a la adición de gran contenido de materia orgánica que presenta, ya que el sitio de muestreo presenta vegetación herbácea la cual juega un gran papel en el mantenimiento de las bases, pues las gramíneas son eficaces para absorber y devolver grandes cantidades de cationes en la hojarasca, flujo del tallo y procesos subterráneos como la exudación de la raíz (Bockheim y Gennadiyev, 2000; Sutton y Sposito, 2006), gracias a esta estabilización y la influencia de la vegetación este suelo presenta una estructura migajosa, la cual es típica en horizontes superficiales ricos en materia orgánica bien evolucionada que genera una porosidad interna más elevada y una mayor agregación del suelo (Ortiz, *et al.*, 2008).

Por otra parte, el suelo situado en Santiago Nezapilla denominado como Eutric Chromic Andic Cambisol (Colluvic, Loamic, Magnesic, Profundihumic) es un suelo profundo que supera los 100 cm de profundidad, el principal factor de formación es el relieve debido a la aportación de sedimentos derivados del arrastre mecánico de las partículas. En los horizontes subsuperficiales se presentan procesos de neoformación e incipiente traslocación de arcillas, además de desarrollo de estructura, cambio de color y contenido de arcillas con respecto a los horizontes subyacentes, esto es evidencia de un proceso inicial de edafogénesis que pertenecen a horizontes cámbicos (IUSS, 2015). Por otra parte, el material parental presente es andesita el cual es rico en ferromagnesianos (García-Tovar *et al.*, 2015), el magnesio es un metal que bajo las condiciones oxidantes de la atmósfera edáfica se solubiliza rápido quedando libre, por lo que es fácilmente lixiviado a zonas receptoras.

7.2 Carbono orgánico y su relación con propiedades físicas y químicas del suelo

7.2.1 Carbono orgánico y la profundidad

En ambos suelos el mayor contenido de carbono son para los horizontes superficiales denominados horizontes A, este está por debajo de los horizontes O los cuales están compuestos por ramas y restos vegetales (capa orgánica). En los horizontes A, enraízan las especies herbáceas, es rico en materia en descomposición y humus debido a los complejos órgano-mineral que pueden formarse es que surge el color más oscuro (IUSS, 2015).

La presencia de carbono por debajo del horizonte A se debe a la entrada de MO en los horizontes del subsuelo que ocurre debido a las raíces y sus exudados, MO disuelta y/o bioturbación, estas dependen del clima, suelo, relieve y tipos de vegetación. Además, puede haber traslocación de partículas orgánicas y transporte de materia orgánica ligada a la arcilla en ciertos tipos de suelos (Rumpel y Kögel-Knabner, 2010).

De acuerdo con Rojas-García y colaboradores (2017) presentaron un análisis de datos del COS en los ambientes terrestres para México donde el promedio de contenido de carbono orgánico en bosques de pino es de 4.62 % para la capa superficial; sin embargo, se concluyó que la cantidad de carbono es influenciado principalmente por el tipo de suelo y no por la vegetación.

En el suelo presente en San Andrés Lagunas, existe una gran cantidad de herbáceas las cuales generan muchas raíces, este es el origen de la materia orgánica en el suelo, debido a que la estructura que presenta se ve favorecida la distribución dentro del perfil de la raíz mejorando la entrada de carbono en el suelo mineral, por otra parte, las raíces se mueven hacia abajo a través del suelo liberando exudados, al morir y descomponerse liberan C (Rasse y Smucker 1998). Por lo anterior, este suelo presenta altos niveles de C (128 g kg^{-1}) superando el porcentaje designado para los bosques de pino en México (Rojas-García *et al.*, 2017). Kaiser y Guggenberger (2004), realizaron un estudio en un Rendzic Somerirendzic Leptosol (Hyperhumic) con vegetación de Bosques de haya (*Fagus sylvatica* L.) con tres horizontes y un espesor total de 95 cm de profundidad, en A1 obtuvo 112 g kg^{-1} , A2 con 69 g kg^{-1} y C 11 g kg^{-1} , siendo semejantes a los obtenidos en el presente estudio pese a que la vegetación es diferente, debido a que el contenido de carbono no varía conforme a la vegetación, sino a los tipos de suelo y cómo influyen los proceso de formación (Vela *et al.*, 2011). Otro estudio con resultados similares es el de Bautista-Zúñiga y colaboradores (2003), en Somerirendzic Leptosol (Hyperhumic)es con una vegetación de selva baja caducifolia presentaron niveles de 129 g kg^{-1} y 76 g kg^{-1} semejantes a los resultados obtenidos en el presente estudio, reforzando que el contenido de COS se ve influenciado por el tipo de suelo. En este Somerirendzic Leptosol (Hyperhumic) influyen directamente el material parental de roca caliza que beneficia la captación de carbono.

Por otra parte, en el suelo ubicado en Santiago Nezapilla presenta valores de 43.8 g kg^{-1} a 15 g kg^{-1} disminuyendo con la profundidad, esta disminución de las concentraciones de COS con la profundidad en el Cambisol se explica por 2 procesos: 1) Transporte físico del carbono como complejos órgano-mineral debido a la pendiente, pese a que existe una baja precipitación en esta zona, cuando llueve hay un escurrimiento de sedimentos a lo largo de la ladera, en donde llega a zonas de depósitos donde se encuentra este perfil y recibe un constante enriquecimiento en la parte superficial en donde existe un mayor contenido, 2) MO disuelta en la solución del suelo, como se observa en el cuadro 2, en el horizonte 1Bt hay una zona de enriquecimiento de CO, esto debido a la precipitación de la zona que provoca una lixiviación de C a los horizontes subyacentes. Por lo anterior, este suelo presenta niveles cercanos de COS designado para los bosques de Pinos en México (Rojas-García *et al.*, 2017). De acuerdo a Spârchez y colaboradores (2014), en Rumania, realizaron un estudio de variaciones de las propiedades químicas de Cambisoles éutricos en diferentes niveles altitudinales, uso de suelo y unidades geomorfológicas, conforme a esto, los suelos que superan los 900 m de altitud con suelos forestales y una geoforma similar al presente estudio, dieron un contenido de carbono orgánico de 41.82 g kg^{-1} y 47.99 g kg^{-1} en el horizonte superficial con vegetación de haya europea (*Fagus sylvatica* L.), siendo contenidos muy semejantes a los presentados anteriormente. De igual manera, Parra y Candás (2004) en Segovia, con bosques de encino estudiaron la distribución de C en Cambisoles éutricos en donde se hallaron en promedio niveles parecidos a los antes mencionados, en los horizontes Ah1, 42.9 g kg^{-1} .

Por lo anterior, la distribución del carbono orgánico se ve limitado conforme aumenta la profundidad, ya que se ve influenciado por los factores de formación de cada suelo que pueden llegar a permitir una traslocación a horizontes subyacentes, por ejemplo, la posición en la pendiente y la lixiviación causada por la precipitación para el Cambisol.

7.2.2 Carbono orgánico y la densidad aparente

La densidad aparente está influenciada por la presencia de las diferentes fracciones orgánicas y minerales del suelo. De acuerdo a esto, los contenidos de materia orgánica del suelo debe ser el factor con mayor peso para la variabilidad de densidades (Murray *et al.*, 2011). Por lo anterior, el Somerirendzic Leptosol (Hyperhumic) es el suelo que presenta mayor contenido de MO y menor densidad en comparación al Cambisol. En este estudio se presentó una correlación de -0.962 entre estas propiedades, esto concuerda con descrito por Acevedo-Sandoval y colaboradores (2010), en donde señalan el contenido promedio de CO correspondientes a 131.7 g kg⁻¹ como máximo y 100.37 g kg⁻¹ como mínimo y sus densidades aparentes entre 0.78 g cm⁻³ y 0.76 g cm⁻³, para los horizontes superficiales, los cuales concuerdan con los valores del Somerirendzic Leptosol (Hyperhumic) del presente estudio. Por otra parte, suelos con contenido de 38.2 g kg⁻¹ en el horizonte superficial y 13.6 g kg⁻¹ para el horizonte subsuperficial presentaron densidades de 1.1 g cm⁻³ y 1.09 g cm⁻³ concordando con los valores obtenidos para el Cambisol en donde presentaron 43.8 g kg⁻¹ y 15 g kg⁻¹ respectivamente, con densidades de 1g cm⁻³ y 1.1 g cm⁻³.

La variación en los datos de densidad entre ambos suelos se debe a diferencias en el volumen total de poros, a menor densidad aparente mayor espacio poroso, es decir, se trata de un suelo menos compacto por la presencia de la materia orgánica y al ser el Cambisol el suelo con menor contenido de esta, presenta mayores valores de DA (Villalobos-Barquero y Meza-Montoya, 2019). Por lo tanto, la densidad aparente es una variable dependiente de la cantidad de CO que exista en el suelo.

7.2.3 Carbono orgánico y pH

El Somerirendzic Leptosol (Hyperhumic) presenta pH elevado valor de 7.88 considerado medianamente alcalino (cuadro 1). De acuerdo con Bautista-Zúñiga y colaboradores (2003), en un estudio realizado en Yucatán, los suelos estudiados presentaban un pH superior a 7.5 con

profundidades de 5 a 10 cm, estos pH se presentaron debido a la naturaleza del material original, esto concuerda con el suelo presente en San Andrés Lagunas, ya que al ser suelos jóvenes con poco espesor aumenta la interacción del material parental influyendo fuertemente con esta propiedad, aunado a esto, la precipitación presente en la localidad no es considerada alta para que exista alguna lixiviación de bases.

El suelo presente en Santiago Nejapilla se encuentra en una zona de depósito, en donde aparte de sedimentos se pueden transportar cationes, este suelo presenta una alta saturación de bases a lo largo del perfil debido a la influencia de la posición en la pendiente, esta propiedad es importante, porque la proporción de ácidos y bases determina el pH del suelo, cuando el pH es mayor a 7, su saturación de bases llega a un 100 %, lo cual significa que no se encuentran iones de hidrógeno en los sitios de intercambio (Califra, 2012). De acuerdo con Parra y Candás (2004), estudiaron diferentes Cambisoles eútricos en donde el pH era mayor a 7.5 en los horizontes superficiales debido al alto porcentaje de bases que se encuentran en estos suelos, esto concuerda con los resultados presentados, ya que ambos suelos se encuentran en una posición en la pendiente donde son receptores de bases, sedimentos y materia orgánica, esta última afecta el pH del suelo debido a los diversos grupos activos como grupos carboxílicos y fenólicos, que aportan grados de acidez a las bases de cambio y al contenido de nitrógeno presente en los residuos orgánicos (Martínez *et al.*, 2008), sin embargo, en suelos con alto contenido de bases como el Somerirendzic Leptosol (Hyperhumic) y Cambisol esto no se ve afectado por el alto nivel de estabilidad, la fuerte influencia del material parental y el relieve, respectivamente, por lo tanto, en estos suelos el pH es una variable independiente a la cantidad de materia orgánica del suelo.

7.2.4 Contenido de carbono orgánico y la relación con el nitrógeno

En general, la relación que existe del carbono y nitrógeno es positiva ($r = 0.856$), esto indica que ambos aumentan en presencia del otro, de esta manera se puede observar que el Somerirendzic Leptosol (Hyperhumic) presenta los niveles más altos de nitrógeno, que son 10 g kg^{-1} en el horizonte superficial, esto concuerda con lo reportado por Kaiser y Guggenberger (2004), quienes describen que, a niveles similares de carbono, presenta 8.4 g kg^{-1} de nitrógeno en el epipedón. Para el Cambisol, el nivel más alto es de 3.7 g kg^{-1} que, de igual manera, concuerda con lo reportado por Spârchez y colaboradores (2014) con niveles similares de carbono presenta 3.14 g kg^{-1} de nitrógeno en el horizonte superficial.

Sin embargo, los niveles reportados en el presente estudio son considerados bajos y muy bajos, esto puede deberse a que los bosques de pino son de las vegetaciones que menos aporta hojarasca, reduciendo la producción de biomasa viva y su baja desintegración, disminuyen la aportación de nitrógeno al suelo (Rocha-Loredo y Ramírez-Marcial, 2009), esto concuerda con lo señalado por Madrigal y colaboradores (2019), que evaluaron la aportación de hojarasca al suelo en tres diferentes vegetaciones, siendo la del pino quien recibe menos aporte de esta, disminuyendo los contenidos de COS y nitrógeno.

La composición química de las acículas puede depender de las condiciones edafoclimáticas en las que los árboles se encuentren, ya que se reportó una disminución de nitrógeno y un aumento de concentraciones de polifenoles en pinos escoceses cuando se cultivan en condiciones decrecientes de disponibilidad de nitrógeno, por lo que este es otro factor, ya que los niveles encontrados de nitrógeno en el presente estudio son muy bajos y la hojarasca no puede aportar grandes cantidades de este elemento, por lo que, la cantidad de nitrógeno está influenciada directamente con el tipo de

vegetación encontrada en el sitio de estudio siendo independiente al contenido alto de carbono (Beg y Staaf, 1980)

7.2.5 Contenido de carbono orgánico y la relación con la capacidad de intercambio catiónico (CIC)

Existe una estrecha relación entre el contenido de carbono orgánico y la CIC ($r=0.838$), ya que existe una interacción mediante reacciones de intercambio entre los grupos carboxílicos cargados negativamente proveniente de la materia orgánica y los cationes, si existe un mayor contenido, se presentarán más sitios de intercambio y la CIC aumentará (Krull, *et al.*, 2004). En el presente estudio el Somerirendzic Leptosol (Hyperhumic) réndzico es el que mayores valor tiene de CIC, en Ah presenta 128 g kg^{-1} de CO y $47.52 \text{ Cmol (+) kg}^{-1}$, estos resultados concuerdan con lo reportado por Kaiser y Guggenberger (2004) en un Rendzic Leptosol con 112 g kg^{-1} de CO presenta $42.4 \text{ Cmol (+) kg}^{-1}$ Por otra parte, para el Cambisol eútrico en el horizonte superficial presenta $33.88 \text{ Cmol (+) kg}^{-1}$, lo cual concuerda con lo reportado por Parra y Candás, (2004), ya que en Ah1 encontró un valor de $31.8 \text{ Cmol (+) kg}^{-1}$, por lo que se observa la relación existente entre el contenido del CO y la cantidad de la capacidad de intercambio catiónico.

7.2.6 Contenido de carbono orgánico y la relación con calcio

Se observó una relación positiva entre el carbono orgánico y el calcio ($r = 0.963$) (cuadro 2). El suelo con mayor presencia de este elemento es el Somerirendzic Leptosol (Hyperhumic) réndzico el cual, gracias a su naturaleza del material parental de roca caliza, presentó $49.98 \text{ cmol (+) kg}^{-1}$, a diferencia del Cambisol eútrico que presentó $9.8 \text{ cmol (+) kg}^{-1}$. Esto da como resultado mayor presencia de materia orgánica y mayor estabilización. De acuerdo con Parra y Candás 2004, los restos orgánicos presentan una fracción libre que no se ha transformado, una fracción humificada, la cual es más pesada y está ligada a arcillas formando complejos arcillo-húmicos, este proceso es

favorecido por la existencia de caliza presente en el Somerirendzic Leptosol (Hyperhumic), la cual, actúa protegiendo las membranas vegetales y sólo cuando se disuelve progresa la biodegradación, formando compuestos húmicos que quedan estabilizados por el calcio (Duchaufour, 1984). De igual manera Sutton y Sposito (2006), demostraron que la presencia de Ca^{2+} aumentan la retención de materia orgánica en el suelo y promueve la estabilidad de agregados. Se han realizado experimentos de extracción donde eliminan al Ca^{2+} para conocer su función, en donde se ha indicado que los complejos organominerales se mantienen unidos por tal catión (Gaiffe *et al.*, 1984; Muneer y Oades, 1989), de igual manera, Holder y Griffith (1983) determinaron que la materia orgánica presente en suelos calcáreos es difícil de extraer por la presencia de calcio. Oades (1988) concluyó que los suelos con material parental calcáreo tienden a tener mucha más materia orgánica, también menciona que estos suelos están fuertemente relacionados con pH básicos y alta saturación de bases ya que son rasgos derivados principalmente por el material parental, por lo que esta influencia sobre la materia orgánica no puede separarse.

7.2.7 Contenido de carbono orgánico y la relación con magnesio

Existe una relación entre el carbono orgánico y el magnesio negativa ($r = -0.934$), como se observa en el cuadro 2, el suelo con mayores valores de magnesio fue el Cambisol eútrico ($23.78 \text{ cmol (+) kg}^{-1}$), esto es debido a su material parental rico en ferromagnesianos, que dan como resultado menor presencia de materia orgánica, en comparación de el Somerirendzic Leptosol (Hyperhumic) réndzico. La diferencia del contenido de magnesio entre ambos suelos se debe a la posición en pendiente, el magnesio es un catión fácilmente lixiviado, de acuerdo a esto, el Somerirendzic Leptosol (Hyperhumic) se encuentra posicionado en la parte alta de la ladera, a comparación del Cambisol el cual se encuentra en una zona de recepción, debido a esto el magnesio es una variable independiente al contenido de carbono en el suelo.

8. Conclusiones

El suelo que se describió en San Andrés Lagunas, en un bosque de pino se identificó como Somerirendzic Leptosol (Hyperhumic). El suelo descrito en Santiago Nezapilla en un bosque de pino se clasificó como Eutric Chromic Andic Cambisol (*Colluvic, Profundihumic, Loamic, Magnesian*).

En el Somerirendzic Leptosol (Hyperhumic) existe un alto contenido de carbono orgánico a lo largo del perfil debido a la presencia del material parental en los primeros 10 cm, el cual, al ser roca caliza con alto contenido de calcio incrementa su estabilidad formando complejos órgano-mineral, aumentando la estabilidad de agregados, el pH, una menor densidad que aporta mejor aireación al suelo, mayor CIC y una textura favorecedora. En el Eutric Chromic Andic Cambisol (*Colluvic, Profundihumic, Loamic, Magnesian*) presenta un menor contenido de carbono orgánico, esto está relacionado con el bajo contenido de calcio ya que la vegetación no está directamente influenciada en el contenido de materia orgánica, sino en el tipo de suelo y los factores de formación que influyen en cada uno. Existen 5 propiedades con relación significativa entre el COS: densidad aparente ($r = -0.962$), capacidad de intercambio catiónico ($r = 0.838$), nitrógeno ($r = 0.987$), magnesio ($r = -0.941$) y calcio ($r = 0.983$). Por lo anterior, el suelo que presenta más relaciones beneficiosas entre el carbono y sus propiedades es el Somerirendzic Leptosol (Hyperhumic), gracias a su contenido alto de calcio que favorece a la estabilización del humus por su pH óptimo y una buena CIC favoreciendo el intercambio de cationes con la vegetación y una densidad aparente baja generando un suelo con mayor aireación.

9. Bibliografía

- Acevedo, E., Martínez E. (2003). Sistema de labranza y productividad de los suelos, en Acevedo, E.: Sustentabilidad en Cultivos Anuales. Santiago, Universidad de Chile, Serie Ciencias Agronómicas N° 8, p 13-25.
- Acevedo-Sandoval, O., Valera-Pérez, M., Prieto-García, F. Propiedades físicas, químicas y mineralógicas de suelos forestales en Acaxochitlan, Hidalgo, México. Universidad y ciencia [online]. 2010, vol.26, n.2. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0186-29792010000200002&lng=es&nrm=iso. ISSN 0186-2979.
- Aguilera, S. M. (2000). Importancia de la protección de la materia orgánica en suelos. Simposio Proyecto Ley Protección de Suelo. Boletín N° 14. Valdivia, Chile. P. 77-85
- Angers, D., Carter, M. (1996). Aggregation and organic matter storage in cool, humid agricultural soils. In 'Structure and organic matter storage in agricultural soils. (Eds M. R. Carter and B. A. Stewart) pp.193-211.
- Arroyo-Ortega, I., Castelán-Vega, R., Tamaríz-Flores, V., Torres-Ramírez, E., Handal-Silva, An., Chávez-Bravo, E., Cervantes-Galindo, V. (2021). 7.2. Almacén de Carbono Orgánico en suelos forestales restaurados de Ixtacamaxtitlán, Puebla, México. Síntesis del Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México. Pp. 325-330. https://pmcarbono.org/pmc/publicaciones/EACCIM_Sintesis_2021-22.pdf
- Ayala-Niño, F., Maya-Delgado, Y., Troyo-Diéguéz, E. (2015). Secuestro de carbono en suelos con déficit hídrico en la cuenca de la Paz, Baja California Sur, noroeste de México. pp. 154-

161. En: Paz, F., J. Wong y R. Torres (eds.). Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2015. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono

Bautista-Zúñiga, F., Jiménez-Osornio, J., Navarro-Alberto, J., Manu, A., Lozano, R. (2003). Microrelieve y color del suelo como propiedades de diagnóstico en Somerirendzic Leptosol (Hyperhumic)es cársticos. Terra Latinoamericana, 21 (1),1-11.[fecha de Consulta 13 de Julio de 2023]. ISSN. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57321101>

Berg, B., Staaf, H. (1980). Decomposition Rate and Chemical Changes of Scots Pine Needle Litter. II. Influence of Chemical Composition. Ecological Bulletins, 32, 373–390. <http://www.jstor.org/stable/20112825>

Bockheim, J., Gennadiyev, N. (2000). The role of soil-forming processes in the definition of taxa in Soil Taxonomy and the World Soil Reference Base, Geoderma, Volume 95, Issues 1–2, Pages 53-72, ISSN 0016-7061, [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(99\)00083-X](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(99)00083-X). (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001670619900083X>)

Buyanovsky, G., Aslam, M., Wagner, G. (1994). Carbon turnover in soil physical fractions. Soil Sci. Soc. Am. J. 58, 1167-1173.

Califra, A. (2012). Alternativa predictiva de la saturación en bases en suelos ácidos. Tesis. Universidad de la república. <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/9791/1/0137cal.pdf>

Cardero, Y., Garcell, L. (2010). Efecto del potencial iónico sobre la adsorción específica de cationes en suspensiones de laterita y de cieno carbonatado. Tecnología química. Vol XXX. No. 3.

- Caravaca, F., Albaladejo, L. (2004). Aggregate stability and carbon characteristics of particle-size fractions in cultivated and forested soils of semiarid Spain. *Soil & Tillage Research*. 78. 83-90.
- Carrasco, M. (1992). El suelo como sistema químico. En Vera W.: Suelos una visión actualizada del recurso. Publicaciones Miscelaneas Agrícolas N° 38, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, 345.
- CONABIO. (2020). Ecosistemas de México: Bosques Templados. México <https://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/bosqueTemplado>
- Cotler, H., Corona, J., Galeana-Pizaña, J. (2020). Erosión de suelos y carencia alimentaria en México: una primera aproximación. *Investigaciones geográficas*, (101), e59976. Epub 02 de octubre de 2020. <https://doi.org/10.14350/rig.59976>
- Cruz, M. (2008). Plan municipal de desarrollo, municipio Santiago Nezapilla Tep. Oaxaca. https://finanzasoxaca.gob.mx/pdf/inversion_publica/pmds/08_10/479.pdf
- Duchaufour, P. (1984). 1. Edafogénesis y Clasificación.. Masson, S. A., Barcelona, 493 pp
- Doran, J. W. and Safley, M. (1997). Defining and assessing soil health and sustainable productivity. In 'Biological Indicators of Soil Health. (Eds C. E. Pankhurst, B. M. Doube, and V. V. S. R. Gupta.) pp. 1-28. (CAB International: New York.)
- FAO, 2009. Guía para la descripción de suelos. Cuarta edición. Roma, Italia. <https://www.fao.org/3/a0541s/a0541s.pdf>
- Follett, R., Stewart, B. (1985). Soil erosion and crop productivity. American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin, USA. 1985; p. 533.

- Gaiffe, M., Duquet, B., Tavant, H., Tavant, Y., Bruckert, S., (1984). Stabilité biologique et comportement physique d'un complexe argilo-humique placé dans différentes conditions de saturation en calcium ou en potassium. *Plant Soil* 77, 271–284.
- Galantini, J. (2002). Contenido y calidad de las fracciones orgánicas del suelo bajo rotaciones con trigo en la región semiárida pampeana. *INTA, Argentina. RIA*, 30, 125-146.
- Galicia, L., Gamboa, A., Cram, S., Chávez, B., Peña, V., Saynes, V., Siebe, C. (2016). Almacén y dinámica del carbono orgánico del suelo en bosques templados de México. *Terra Latinoamericana*, 34(1), 1-29.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792016000100001&lng=es&tlng=es.
- Gama, G. (2022). Conductividad hidráulica en suelos de bosque de pino y pastos subalpinos en la sub-cuenca Tulmiac-Tláloc, Sierra del Chichinautzin, México. Tesis de licenciatura.
<http://132.248.9.195/ptd2022/agosto/0828808/Index.html>
- Gamarra, C., Díaz, M., Vera, M., Galeano, M., Cabrera, A. (2018). Relación carbono-nitrógeno en suelos de sistemas silvopastoriles del Chaco paraguayo. *Rev Mexicana de Ciencias Forestales*. Vol. 9 (46). <https://www.scielo.org.mx/pdf/remcf/v9n46/2007-1132-remcf-9-46-4.pdf>
- García-Tovar, G, Martínez-Serrano, R., Solé, J., Correa-Tello, J., Núñez-Castillo, E., Guillou, H., Monroy-Rodríguez, E. (2015). Geología, geocronología y geoquímica del vulcanismo Plio-Cuaternario del Campo Volcánico Apan-Tecocomulco, Faja Volcánica Trans-Mexicana. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 32(1), 100-122.

http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1026-87742015000100009&lng=es&tlng=es.

Greenland, D. Rimmer, D. Payne, D. (1975). Determination of the structural stability class of English and Welsh soils, using a water coherence test. *Journal of Soil Science* 26, 294-303

Hayes, M., Clapp, C. (2001). Humic substances: considerations of compositions, aspects of structure, and environmental influences. *Soil Science*, 166, 723-737.

Hazma, M., Anderson, W. (2005). Soil compaction in cropping systems. A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil Till. Res.* 82, 121-145.

Hedges, J., Keil, R. (1995). Sedimentary organic-matter preservations- an assessment and speculative synthesis. *Mar. Chem.*, 49 (2-3), 81-115.

Holder, M., Griffith, M. (1983). Some characteristics of humic materials in Caribbean Vertisols. *Can. J. Soil Sci.* 63, 151-159.

INEGI, (2010). Compendio de información geográfica municipal 2020. San Andrés Lagunas, Oaxaca.

https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/20/20093.pdf

Iuss Working Group Wrb. (2015) Base de referencia mundial para los recursos del suelo 2014, actualización 2015: Sistema internacional de clasificación de suelos para nombrar suelos y crear leyendas para mapas de suelos. *World Soil Resources Reports No. 106*, 192

Kaiser, K., Guggenberger, G., Haumaier, L. 2004. Changes in dissolved lignin-derived phenols, neutral sugars, uronic acids, and amino sugars with depth in forested Haplic Arenosols. *Biogeochemistry* 70: 135-151.

and Rendzic Leptosols

Kay, B. Angers, A. (1999). Soil Structure. In 'Handbook of Soil Science. (Ed M. E. Sumner.) p. A-229 - A-276. (CRC Press: Boca Raton, USA.)

Kononova, M. (1966). Soil organic matter. Its nature, its role in soil formation and in soil fertility, 2nd ed.; Pergamon Press: Oxford.U.K.

Krull, S, Skjemstad, J, Baldock, A. (2004). Functions of soil organic matter and the effect on soil properties. Grains Research & Development Corporation report Proyect No CSO 00029.

Krasilnikov, P., Jiménez-Nava, F. J., Reyna-Trujillo, T., García-Calderón, N. (2011). Geografía de suelos de México. México: Las Prensas de Ciencias, UNAM.

Krasilnikov, P., Gutiérrez-Castorena, M., Ahrens, R., Cruz-Gaistardo, C., Sergey, S., Solleiro-Rebolledo, E. (2013). The soils of Mexico. World Soils Book series, Springer, New York, NY, USA

Kulli, B., (2002). Analysis of flow patterns. The influence of soil compaction and soil structure on the infiltration pathways of dye tracer solutions and the quantitative evaluation of flow patterns. Thesis for the degree of Doctor of Natural Sciences, Swiss Federal Institute of Technology. 109 p.

Loveland, J Webb. (2003) Is there a critical level of organic matter in the agricultural soils of temperate regions: a review, Soil and Tillage Research, Volume 70, Issue 1, , Pages 1-18, ISSN 0167-1987, [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(02\)00139-3](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(02)00139-3),
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198702001393>)

- Madrigal, S., Acevedo, C., Hernández, D., Romo, J. (2019). Influencia de la cobertura, pendiente y profundidad, sobre el carbono y nitrógeno del suelo. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 10(51), 201-223. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v10i51.113>
- Martínez, E., Fuentes, J., Acevedo, E. (2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo. *J. Soil Sc. Plant Nutr.* 8 (1), 68-96
- McGrath, S., Sanders, R., Shalaby, H. (1988). The effects of soil organic matter levels on soil solution concentrations and extractibilities of manganese, zinc and copper. *Geoderma* 42, 177-188.
- Montes, P., López, J. (2005). Cartografía geomorfológica analítica de la porción Norte de la Mixteca Alta, Oaxaca, México. <http://observatoriogeograficoamericalatina.org.mx/egal10/Procesosambientales/Geomorfologia/06.pdf>
- Muneer, M., Oades, M., (1989). The role of Ca-organic interactions in soil aggregate stability. II. Field studies with ^{14}C -labelled straw, CaCO_3 and $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. *Aust. J. Soil Res.* 27, 401–409
- Murray, R., Bojórquez, J., Hernández, A., Orozco, M., García, J., Gómez, R., Ontiveros, H., Aguirre, J. (2011). Efecto de la materia orgánica sobre las propiedades físicas del suelo en un sistema agroforestal de la llanura costera norte de Nayarit, México. *Bio ciencias*. Vol 1. Num 3. P.27-35.
- Navaro, J., Mataix, J. (2014). Aproximación al conocimiento de los paleosuelos de la provincia de alicante. *Rev. Cidaris*. 32. P. 21-31
- Oades, J.M., (1988). The retention of organic matter in soils. *Biogeochem.* 5, 35–70

- Ortiz, O. (2011). Plan de Desarrollo Municipal de San Andrés Lagunas.
https://finanzasoxaca.gob.mx/pdf/inversion_publica/pmds/11_13/093.pdf
- Ortíz, I. Fernández, E., Martín, F., Dorronsoro, C. (2008). Estimación de propiedades físicas del suelo en gabinete y su aplicación en la identificación de horizontes edáficos. *Rev. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*. 16. Pp. 57-63.
- Parra, J., Candás, M. (2004). Materia orgánica de suelos bajo encinas. Mineralización de carbono y nitrógeno. *Sistema de recurso Forestal*. P. 75-83.
<https://revistas.inia.es/index.php/fs/article/view/856/853>
- Peverill, K. I., Sparrow, L. A., Reuter, D. J. (1999). 'Soil Analysis. An Interpretation Manual.' (CSIRO Publishing: Collingwood.)
- Rasse. P., Smucker, A (1998) Root recolonization of previous root channels in corn and alfalfa rotations. *Plant Soil* 204:203–212
- Rivera, E., Sánchez, M., Domínguez, H. (2018). pH como factor de crecimiento en plantas. *Revista De Iniciación Científica*, 4, 101-105. <https://doi.org/10.33412/rev-ric.v4.0.1829>
- Rocha-Loredo, A., & Ramírez-Marcial, N. (2009). Producción y descomposición de hojarasca en diferentes condiciones sucesionales del bosque de pino-encino en Chiapas, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, (84), 1-12.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-21282009000100001&lng=es&tlng=es.
- Rojas-García, F., Santoyo-Gómez, G., González-Montiel, E., Velázquez-Rodríguez, A., Pulido-Ponce, J. (2017). La ciencia del suelo en el ciclo del carbono de México. *Elementos para políticas públicas*. (2). <http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/105813/Art>

%C3 %ADculo %20La %20Ciencia %20del
%20Suelo_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Rumpel, C., Kögel-Knabner, I. (2010). Deep soil organic matter – a key but poorly understood component of terrestrial C cycle. *Plant soil* 338. Pp 143-158.

Rzedowski, J. (1992). Diversidad y orígenes de la flora fanerogámica de México. *Ciencias* número especial 6:47-56

Sandoval-García, R., González, R., Jiménez, J. (2021). Análisis multitemporal del cambio en la cobertura del suelo en la Mixteca Alta Oaxaqueña. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 12(66), 96-121. Epub 04 de octubre de 2021. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i66.816>

Santamaría-Díaz, A., Alaniz-Álvarez, S., Nieto-Samaniego, A. (2008). Deformaciones cenozoicas en la cobertura de la falla Caltepec en la región de Tamazulapam, sur de México. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 25(3), 494-516. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1026-87742008000300009&lng=es&tlng=es.

Santiago-Mejía, B., Martínez-Menez, M., Rubio-Granados, E., Vaquera-Huerta, H., Sánchez-Escudero, J (2018). Variabilidad espacial de propiedades físicas y químicas del suelo en un sistema lama-bordo en la Mixteca Alta de Oaxaca, México. *Agricultura, sociedad y desarrollo*, 15(2), 275-288. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-54722018000200275&lng=es&tlng=es

Schöning, I., Kögel-Knabner, (2006). Chemical composition of young and old carbon pools throughout Cambisol and Luvisol profiles under forests. *Soil Biology & Biochemistry* 38 (2006) 2411–2424

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). (2017). Oaxaca, sólido productor agrícola y gastronómico. <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/oaxaca-solido-productor-agricola-y-gastronomico#:~:text=El%20estado%20tiene%20una%20importante,%C3%A9stos%20los%20cultivos%20m%C3%A1s%20representativos.>

Spârchez, G., Dincă, L., Marin, G., Dincă, M., Enescu, R. (2014). Variation of eutric Cambisols' chemical properties based on altitudinal and geomorphologic zoning. *Environmental engineering and management journal*. Vol.16. No.12. P. 2911-2918. https://www.researchgate.net/profile/Lucian-Dinca/publication/323239607_Variation_of_eutric_cambisols'_chemical_properties_based_on_altitudinal_and_geomorphologic_zoning/links/5a8e7f940f7e9b2fac831e07/Variation-of-eutric-cambisols-chemical-properties-based-on-altitudinal-and-geomorphologic-zoning.pdf

Sutton, R., Sposito, G. (2006). Molecular simulation of humic substance–Ca–montmorillonite complexes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(14), 3566-3581

Tsutsuki, K. (1993). Organic matter and soil fertility. *Obihiro Asia and the Pacific Seminar on Education for Rural Development*, Hokkaido. 1-12.

Van Reewick, L. P. (2002). Procedures for soil analysis. International Soil Reference and Information Center. 6aed. Wageningen, The Netherlands.

- Van Rensburg, H., Van Rensburg H., Claassens A., Beukes D. (2009). Relationships between soil buffer capacity and selected soil properties in a resource-poor farming area in the Mpumalanga Province of South Africa. *South African Journal of Plant and Soil* 26:237-243.
- Vela, G., López, J., Rodríguez, M. (2012). Niveles de carbono orgánico total en el Suelo de Conservación del Distrito Federal, centro de México. *Investigaciones geográficas*, (77), 18-30. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112012000100003&lng=es&tlng=es.
- Velasco, M. (2021). Caracterización y modelo geológico a partir de la exploración magnetométrica en San Andrés Lagunas, Oaxaca. Tesis de licenciatura. <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmLui/bitstream/handle/RepoFi/17672/Portada.pdf?sequence=7&isAllowed=y>
- Villalobos-Barquero, V., Meza-Montoya, A. (2019). Impacto en la aparente densidad del suelo provocado por el tránsito de búfalos (*Bubalus bubalis*) en arrastre de madera. *Revista de Ciencias Ambientales*, 53 (2), 147-155. <https://dx.doi.org/10.15359/rca.53-2.8>
- Zagal, E., Córdova, C. (2005). Indicadores de Calidad de la Materia Orgánica del Suelo en un Andisol Cultivado. *Agricultura Técnica*, 65 (2), 186-197. <https://dx.doi.org/10.4067/S0365-28072005000200008>