



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**“CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS Y SU
RELACIÓN CON LA MATERIA ORGÁNICA EN
SUELOS DE LA FINCA MONTE CARLO; MUNICIPIO
DE SANTA MARÍA HUATULCO, SIERRA SUR DE
OAXACA”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

BIÓLOGA

P R E S E N T A:

LILIANA DEL CARMEN VALDÉS ARENAS



**DIRECTOR DE TESIS:
DRA. NORMA EUGENIA GARCÍA CALDERÓN**

2008



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.

Hoja de datos del jurado

1. Datos del alumno
Valdés
Arenas
Liliana del Carmen
55 13 38 59
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias
Biología
300207648
2. Datos del tutor
Dra.
Norma Eugenia
García
Calderón
3. Datos del sinodal 1
Dr.
Pavel
Krasilnikov
4. Datos del sinodal 2
Dra.
Amada Laura
Reyes
Ortigoza
5. Datos del sinodal 3
M. en C.
Iván Emmanuel
Reyes
Solís
6. Datos del sinodal 4
M. en C.
María del Socorro
Galicía
Palacios
7. Datos del trabajo escrito
Caracterización de los agregados y su relación con la materia orgánica en
suelos de la Finca Monte Carlo; Municipio de Santa María Huatulco, Sierra
Sur de Oaxaca.
84 p.
2008

DEDICATORIA

A mi madre,

A mi abuela,

A la memoria de mi padre.

Agradecimientos

A mi madre, por representar mi más grande ejemplo de vida, por brindarme su apoyo en todo momento.

A mi abu, por su gran cariño, tiempo dedicado y por sus grandiosas enseñanzas.

A mi hermano, quien a su manera siempre me hizo saber que estaba ahí.

A Rene, por su paciencia, apoyo y cariño incondicional.

A don Efrén Max Ricardes y Silvia Salas, quienes permitieron la realización del trabajo de campo en la finca Monte Carlo.

A don Chepe y doña Toña, quienes durante el trabajo de campo nos acogieron con amistad y cariño.

A la Dra. Norma García, por haberme brindado esta gran oportunidad, por su paciencia, tiempo y observaciones.

A mis sinodales, Dr. Pavel Krasilnikov, Dra. Amada Laura Reyes, M. en C. Iván Emmanuel Reyes, M. en C. Ma. del Socorro Galicia, por sus valiosas aportaciones en la revisión del trabajo.

A mis grandes amigas Maira y Alicia, con quienes los momentos difíciles se hicieron más llevaderos y los buenos momentos, aún mejores.

A Liz, por brindarme su apoyo siempre que lo necesité, por compartir sus grandísimos conocimientos, por sus comentarios que enriquecieron mi trabajo, por su amistad.

A todos en el laboratorio de Edafología, en especial a Abel, por tantos momentos compartidos.

Quiero agradecer de manera especial a PAPIIT, que permitió la realización de esta tesis a través de sus proyectos IN2169063 e IN104807.

A todos los que directa o indirectamente favorecieron la realización y culminación de este gran esfuerzo.

ÍNDICE

Dedicatoria	3
Agradecimientos	4
Capítulo I Introducción	
1 Importancia de los suelos tropicales.....	7
2 Justificación.....	9
3 Objetivos.....	9
4 Hipótesis.....	10
Capítulo II Marco teórico	
1 Bosques tropicales.....	11
2 Mantillo forestal.....	12
3 La estructura del suelo.....	15
4 Agregados.....	17
5 Proceso de formación de agregados.....	17
6 Factores que influyen en la formación y estabilización de agregados.....	19
6.1 Textura.....	20
6.2 Mineralogía.....	21
6.3 Materia orgánica.....	21
6.4 Profundidad del perfil.....	23
Capítulo III Caracterización de la zona de estudio	
1 Localización.....	25
2 Fisiografía.....	25
3 Geología.....	27
4 Suelos.....	28
5 Clima.....	29
6 Vegetación.....	30
Capítulo IV Material y métodos	
1 Establecimiento de los sitios de muestreo.....	32
2 Muestreo del mantillo forestal.....	33
3 Muestreo de suelo.....	34

4 Metodología de laboratorio.....	34
4.1 Análisis del mantillo.....	35
4.1.1 Análisis físico.....	35
4.1.2 Análisis químicos.....	35
4.2 Análisis de suelo.....	36
4.2.1 Análisis de las muestras de densidad.....	36
4.2.2 Método para el manejo de agregados.....	37
5 Análisis estadístico.....	40
Capítulo V Resultados	
1 Caracterización del mantillo forestal.....	42
2 Caracterización del suelo.....	50
3 Análisis de correlación.....	58
Capítulo VI Discusión	
1 Mantillo forestal.....	63
2 Suelo.....	67
3 Análisis de correlación.....	69
Conclusiones.....	71
Literatura citada.....	72
Anexos	
1 Descripción morfológica de los perfiles de suelo.....	81
2 Estadística descriptiva de los análisis de mantillo forestal.....	83
3 Estadística descriptiva de los análisis de suelo.....	84

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1. Importancia de los suelos tropicales

Los bosques tropicales abarcan una gran extensión del territorio mundial y son importantes, tanto en el ámbito social como biológico. La gente obtiene diversos productos, como madera, materias primas, medicina y alimento (Brown y Lugo, 1982). Por otro lado, en sistemas agroforestales de México, Moguel y Toledo (1999) destacan la importancia de estos ambientes para la conservación de la biodiversidad. Basados en observaciones y revisiones bibliográficas, identificaron un gran número de especies de aves, plantas, artrópodos, mamíferos, anfibios y reptiles asociados a los bosques que sostienen cultivos agroforestales.

En suelos de los bosques tropicales existe un constante aporte de materia orgánica. El mantillo forestal es rápidamente transformado e incorporado a la fracción mineral del suelo en forma de materia orgánica del suelo (MOS), por la acción de microorganismos. La MOS lleva a cabo diversas funciones, entre las que se encuentra facilitar el almacenaje y disponibilidad de nutrimentos para las plantas y organismos edáficos, participar en la formación de la estructura del suelo al actuar como agente cementante entre las partículas minerales y orgánicas (Plaster, 2000; Hillel, 1998; Golchin et al., 1997).

El inicio de la agregación del suelo comprende varios procesos simultáneos. Los microagregados (2-20 μ m de diámetro) ocurren cuando las partículas primarias y las arcillas se unen con restos de bacterias y hongos. Cuando los microagregados se unen entre sí y con restos de hongos y plantas forman agregados de tamaño mayor (20-250 μ m de diámetro). Los agentes orgánicos que sirven de puente y mecanismos de estabilización de microagregados son relativamente persistentes y

consisten de materiales húmicos o polisacáridos fuertemente adsorbidos en las arcillas. Los microagregados, por su parte, se unen para formar macroagregados (>250µm de diámetro) mediante agentes de unión transitorios (materiales orgánicos fácilmente degradables, la mayoría polisacáridos derivados de plantas y microorganismos) y agentes de unión temporal (pequeñas raíces, hifas, bacterias y algas) (Jastrow y Miller, 1997). También existen materiales inorgánicos que sirven como agentes cementantes, como: carbonato de calcio, importante en zonas áridas y semiáridas y óxidos de hierro y aluminio, importantes en suelos de ambientes tropicales, en los que se ha observado que son los principales responsables en la formación y estabilización de agregados (Six et al., 2002; Hillel, 1998).

Los agregados del suelo favorecen el establecimiento de la vegetación, al beneficiar el desarrollo y crecimiento de las raíces, la infiltración y aportes de oxígeno. Además, protegen de forma física a la materia orgánica del suelo durante los procesos de mineralización y humificación de la materia orgánica del suelo (MOS). En estos procesos intervienen principalmente bacterias y hongos, los cuales se encargan de descomponer la MOS en compuestos solubles o gaseosos. Al quedar la materia orgánica inmersa dentro de los agregados, el acceso de los microorganismos para degradar la materia orgánica se dificulta y reduce, lo cual resulta en una disminución en su velocidad de mineralización (Hillel, 1998; Feller y Beare, 1997; Golchin et al., 1997; Jastrow y Miller, 1997).

En suelos de ambientes tropicales, se encontró que el tamaño de agregados estables en agua dominante corresponde a macroagregados con diámetro mayor a 200 µm, seguidos de mesoagregados (20-200 µm) y por último de microagregados, con diámetro menor a 20 µm (Barthès et al., 2008).

Debido a las características que presentan los suelos tropicales, es importante realizar estudios que profundicen en el conocimiento y conservación de ambientes

tropicales. En este caso específico, del bosque tropical subcaducifolio que estuvo sujeto a un sistema agroforestal en la Sierra Sur de Oaxaca.

2. Justificación

Los agentes responsables de la formación y estabilización de los agregados no están del todo comprendidos para las zonas tropicales. Por otro lado y debido a la importancia que los ambientes tropicales tienen en la preservación de servicios ambientales, recursos naturales y biodiversidad, es importante conocer los procesos que se llevan a cabo en estos ambientes. Este estudio pretende profundizar en el conocimiento de la caracterización de los horizontes orgánicos y la estructura del suelo en un bosque tropical subcaducifolio que sostuvo un sistema agroforestal para la producción de café y que actualmente se encuentra abandonado.

3. Objetivos

El objetivo general de este trabajo es conocer el tipo de horizonte orgánico y la estabilidad edáfica en dos grupos de suelos tropicales.

Objetivos particulares:

- Conocer el tipo de humus y caracterizar sus horizontes orgánicos.
- Conocer la estructura del suelo.
- Determinar la estabilidad de los agregados del suelo.
- Conocer los principales agentes involucrados en la estabilidad de agregados.
- Relacionar la estabilidad de agregados con la granulometría del suelo, así como con el carbono orgánico presente en las diferentes fracciones granulométricas.

- Conocer la calidad de sitio considerando el tipo de humus y la estabilidad de los agregados.

4. Hipótesis

- Se espera que el tipo de humus bajo condiciones tropicales sea de tipo mull.
- En condiciones de bosque tropical, se espera que la estabilidad estructural sea alta.
- La estabilidad estructural tendrá una mayor relación con el carbono orgánico asociado a limos y arcillas que con arenas.
- Al presentar un tipo de humus desarrollado y una alta estabilidad de agregados, la calidad de los sitios será alta.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

1. Bosques tropicales

El suelo desempeña cinco funciones básicas: (1) promueve el crecimiento vegetal; (2) lleva a cabo el ciclaje biogeoquímico de elementos; (3) proporciona hábitat a organismos edáficos; (4) funciona como filtro para el agua en su paso hacia el manto freático y (5) es soporte de la vida humana (Weil y Magdoff, 2004). Por otro lado, el suelo constituye el mayor almacén de carbono a nivel global, con 1380 billones de toneladas (Brown y Lugo, 1982).

Además de las funciones mencionadas anteriormente, los suelos de los bosques tropicales, que representan aproximadamente la mitad de toda la superficie boscosa del mundo (Brown y Lugo, 1982), proporcionan diversos servicios ecológicos, como secuestro de carbono, recarga de acuíferos y prevención de la erosión (Blackman et al., 2007). A nivel global, acumulan alrededor del 46% del carbono orgánico contenido en toda la Tierra. De ese porcentaje, los suelos acumulan alrededor del 41%, la vegetación 58% y el mantillo forestal 1%, respectivamente, convirtiéndose en el segundo compartimiento más grande del ciclo del carbono (Scharpenseel, 1997; Brown y Lugo, 1982). Por otro lado, al presentar una relación de temperatura y precipitación alta favorecen la rápida transformación de la materia orgánica (Hevia et al., 2003), llegando a ser casi el doble de rápida que en ambientes templados (Six et al., 2002; Nair et al., 1999). La rápida transformación de la materia orgánica que entra al suelo en los bosques tropicales es responsable de que el mantillo forestal presente de manera general en estos ambientes dos horizontes principales, el de hojarasca, poco espeso y el de fermentación, más espeso que el primero (Pritchett, 1986).

2. Mantillo forestal

El mantillo es la primera categoría de materia orgánica del suelo, está constituido por una mezcla de materiales orgánicos en diferentes niveles de descomposición, y representa una fuente potencial de energía para las especies que los consumen y para la vegetación (Cuevas y Lugo, 1998; Duchaufour, 1978). Entre sus funciones se encuentra el proporcionar condiciones de temperatura y humedad uniformes, ofrecer una protección física ante el impacto de las gotas de lluvia, prevención de la erosión y aumento de la infiltración de agua (Pritchett, 1986).

Se distinguen tres capas principales en el mantillo forestal:

OI: Restos vegetales y /o animales sin alterar.

Of: Horizonte en que los restos biológicos se encuentran parcialmente degradados, pero que aún es posible identificarlos.

Oh: Materia orgánica completamente degradada, no identificable. Se encuentra mezclada con el suelo mineral (Broll et al., 2006; Pritchett, 1986).

Las capas mencionadas anteriormente constituyen el horizonte O, del que existen varios tipos y subtipos morfológicos, según características que se dichos horizontes presenten.

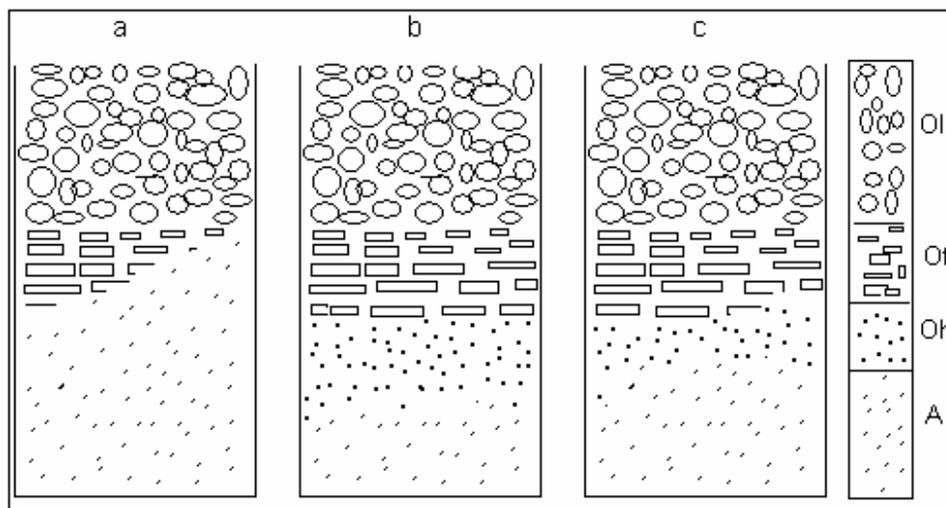


Figura 2.1 Representación esquemática de los principales tipos de mantillos forestales. (a) humus tipo mull; (b) humus tipo moder; (c) humus tipo mor

Entre los principales tipos de mantillos forestales se encuentran mull, moder y mor (Figura 2.1).

- ⇒ El mantillo tipo *mull* presenta los horizontes Ol y Of (este último puede o no estar presente), con límites difusos y de poco espesor, debido a una alta actividad biológica, lo cual permite que los procesos de mineralización y humificación sean rápidos. Se establecen sobre un horizonte A con un espesor aproximado de diez centímetros, con alta presencia de raíces y estructura migajosa a granular. Condiciones cercanas a la neutralidad
- ⇒ El mantillo *moder* muestra los horizontes Ol, Of y Oh con transiciones graduales entre ellos y con el horizonte mineral sobre el que se establecen. Sus espesores son mayores que en el mantillo tipo mull debido a que la actividad biológica es menor y por lo tanto, la velocidad de transformación de los materiales vegetales es más lenta. Condiciones ácidas.
- ⇒ En el mantillo tipo *mor* se encuentran los horizontes Ol, Of y Oh; sin embargo, el horizonte Oh es más delgado que el que se encuentra en el tipo moder. En conjunto, presentan un espesor mayor que el del horizonte A. Los límites entre sus horizontes son claros, por lo que resulta fácil separarlos. Hay una incorporación muy débil o nula de la materia orgánica al material mineral y una transformación muy leve de los restos biológicos. Condiciones fuertemente ácidas. (Broll et al., 2006; Siebe et al., 2006; Ponge, 2003; Matus y Maire, 2000; Pritchett, 1986).

Existen además subórdenes o subtipos de humus, los cuales se determinan en relación a diversas características, entre las que se resaltan si el horizonte presenta una buena aireación y/o flujo de agua, así como el tipo de organismos que se encuentren en él.

La producción y acumulación de mantillo forestal favorece la formación del humus, el secuestro de carbono y la fertilidad del suelo; contribuye también en el proceso de ciclaje de nutrientes en ecosistemas terrestres (Descheemaeker et al., 2006).

Además, el mantillo forestal proporciona microclimas en los que habitan grandes cantidades de organismos edáficos (Ponge, 2003; Pritchett, 1986).

Los procesos de descomposición del mantillo forestal dependen de factores físicos, químicos y biológicos. El primero de ellos se refiere principalmente a la aireación, temperatura y precipitación presentes en el ambiente. En los ambientes tropicales, la dinámica de descomposición del mantillo es muy rápida, al presentarse condiciones de temperatura y precipitación favorables para la actividad biológica (Hevia et al., 2003). Esto implica que la pérdida de elementos a la que se someten los árboles se ve rápidamente compensada, al quedar nuevamente disponibles en un corto tiempo (Veneklaas, 1991).

El factor químico está representado por la capacidad que presenten los elementos para unirse con los iones del suelo durante el proceso de descomposición, ya que la materia orgánica puede quedar protegida de la futura degradación al ser adsorbida por partículas de arcilla. También está caracterizado por la calidad y la composición química de los residuos orgánicos, la cual varía entre las especies vegetales. Se encontró en una selva tropical que la vegetación que tiene un mayor contenido de azúcares, lípidos y proteínas se descompone más rápidamente que la que posee una cantidad mayor de compuestos fenólicos y terpenos. Los taninos y ligninas son considerados como retardadores de la descomposición, al poseer una estructura compleja que hace difícil el acceso a los organismos (Osuna y Pérez-Amador, 2003).

El factor biológico corresponde a la comunidad de descomponedores que se encuentran presentes en cada sitio, principalmente microorganismos, que juegan un papel crucial en la transferencia de nutrimentos desde el mantillo forestal hasta las plantas, para que puedan ser reutilizados (Heal et al., 1997; Laskowski et al., 1995; Veneklaas, 1991).

El proceso de desintegración del mantillo forestal puede comenzar incluso antes de que las hojas se pierdan de los árboles, debido a que elementos reconocidos por su alta solubilidad en materia orgánica viva y muerta, como el sodio y potasio, se pierden rápidamente al entrar en contacto con el agua de lluvia (Burghouts et al., 1998; Brasell et al., 1980; Attiwill, 1968). La dinámica de descomposición continúa en el suelo forestal, lugar en el cual se presenta una invasión por desintegradores primarios (bacterias y hongos), durante la que se lixivian azúcares, ácidos orgánicos y polifenoles; estos primeros pasos en la descomposición del mantillo forestal llevan alrededor de dos meses. El proceso de desintegración continúa a cargo de una variedad de organismos del suelo, principalmente microorganismos como bacterias, hongos y animales invertebrados que se encargan principalmente de degradar los principales polímeros constituyentes del mantillo: ligninas, celulosas y hemicelulosas. La fauna del suelo se encarga principalmente de reducir la hojarasca a fragmentos pequeños y de esta forma acelerar el proceso de humificación, hasta transformar el mantillo forestal en materiales minerales y constituyentes del humus (Berg y Laskowski, 2006; Barajas-Guzmán y Álvarez-Sánchez, 2003; Pritchett, 1986).

3. La estructura del suelo

La estructura del suelo se refiere al arreglo tridimensional de las partículas minerales primarias, representadas por arenas, limos, arcillas; partículas secundarias, también llamadas agregados y los constituyentes orgánicos. La estructura del suelo desempeña un importante papel para permitir el desarrollo de raíces, el intercambio de agua entre el suelo y la atmósfera, un adecuado ciclo del carbono y que ofrezcan resistencia a la erosión. Por ello, ha sido identificada como un importante índice de calidad en suelos (Vergara y Etchevers, 2004; Hillel, 1998; Golchin et al., 1997).

Porta et al. (1999) y Hillel (1998), definen los siguientes tipos de estructura que presenta el suelo (Figura 2.2):

- ✓ Laminar. Capas horizontales de agregados delgados y aplanados, impide el desarrollo de raíces y el intercambio de agua y aire.
- ✓ Prismática o columnar. Pilares orientados verticalmente, a menudo con seis lados. Cuando la cima de las columnas es angular, se le denomina prismática, mientras que cuando es redondeada se denomina columnar. Si estas estructuras son muy duras las raíces pueden presentar problemas para penetrarlas.
- ✓ En bloque. Bloques cúbicos, angulares, con aristas rectas o subangulares, con aristas curvas; ambas con caras planas bien definidas.
- ✓ Esférica-granular. Agregados redondeados. Sus unidades son llamadas gránulos y cuando son particularmente porosas, migajones.

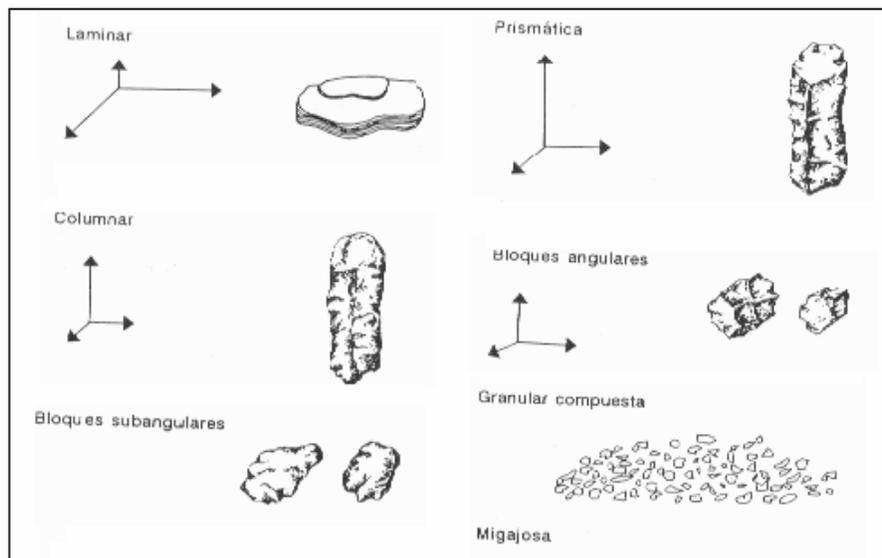


Figura 2.2. Tipos de estructuras del suelo. De Porta et al., 1999.

Las partículas minerales y orgánicas pueden permanecer como unidades individuales y entonces se habla de suelos que carecen de estructura, o bien, unirse fuertemente dando lugar a una estructura masiva, que forma un continuo en el suelo. Un punto medio entre los extremos mencionados consiste en la formación de agregados (Porta et al., 1999).

La unión de las partículas del suelo se lleva a cabo mediante agentes cementantes, representados por materia orgánica, óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio y arcillas (Six et al., 2002). El grado de asociación de las partículas va a determinar la estabilidad estructural, la cual se refiere a la capacidad que posee un suelo de conservar su estructura al ser sometido a algún tipo de estrés (Hillel, 1998). Al mismo tiempo, la unión de partículas del suelo entre sí y con materiales orgánicos favorece el secuestro de carbono, ya que la materia orgánica queda inmersa en el núcleo de los agregados, formando parte de la estructura y de esta forma, está protegida ante futuros procesos de mineralización y humificación así como de ser liberada a la atmósfera (Denef et al., 2001; Six et al., 2000b; Jastrow y Miller, 1997).

4. Agregados

Un tipo de estructura presente en los suelos es la agregada. La asociación de las partículas primarias del suelo conduce a la formación de agregados de diferentes tamaños y estabildades, los cuales son separados por espacios vacíos (Angers y Chenu, 1999). Básicamente, se reconocen dos tamaños de agregados, los macroagregados cuyo diámetro es mayor a $250\mu\text{m}$ y son ensamblajes de agregados más pequeños, los denominados microagregados. El diámetro de los microagregados comprende de los 20 a menos de $250\mu\text{m}$ y representan uniones de arcillas y otras partículas minerales con componentes orgánicos y cuyos enlaces son muy estables (Hillel, 1998; Golchin et al., 1997; Jastrow y Miller, 1997).

5. Proceso de formación de agregados

Se ha propuesto un modelo jerárquico de formación de agregados, en el cual los agregados de mayor tamaño se forman a partir de la unión de microagregados

presentes en el suelo, teniendo como agente cementante a la materia orgánica de reciente incorporación (Figura 2.3).

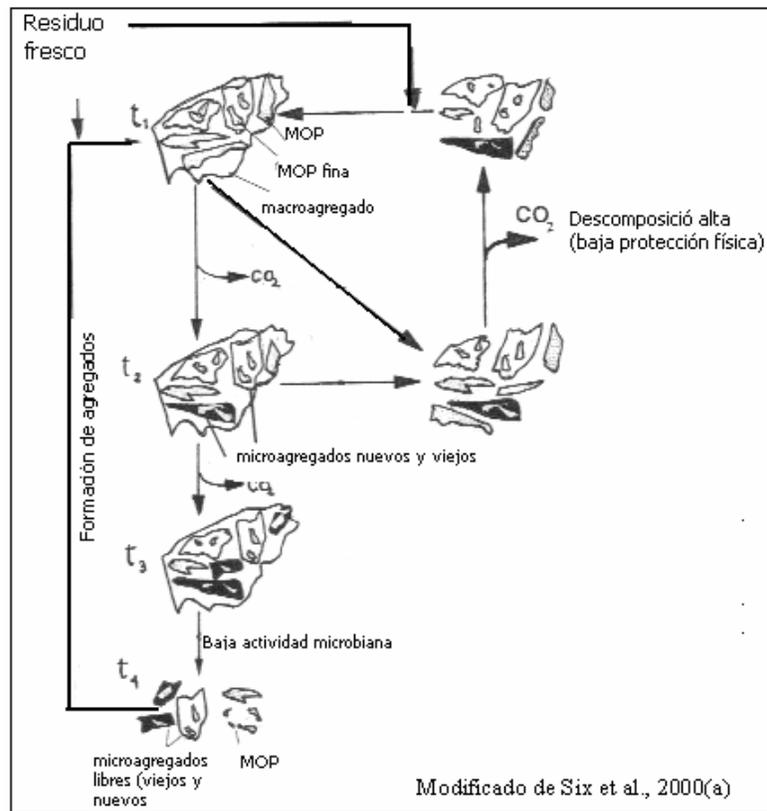


Figura 2.3. Modelo conceptual de formación de agregados. MOP= Materia orgánica particulada

Los restos vegetales son rápidamente colonizados por comunidades microbianas al entrar al suelo. La actividad microbiana resulta en la producción de agentes cementantes provenientes de su metabolismo y que son capaces de unir microagregados con restos de materia orgánica (Golchin et al., 1997). De esta forma, la materia orgánica se convierte en el núcleo de los macroagregados, dentro de los cuales está sujeta a la acción desintegradora de los organismos, convirtiéndola en materia orgánica particulada fina (t_1). Conforme ésta última es formada, se une a partículas de arcilla por productos microbianos para formar microagregados, pero aún dentro de macroagregados (t_2 , t_3). Eventualmente, los agentes cementantes encargados de mantener la unión de macroagregados se

degradan completamente, provocando una disminución en su estabilidad hasta provocar planos de fractura y liberar de esta forma los microagregados que se formaron en su interior y que se convierten en los bloques principales para el comienzo de un nuevo ciclo (t_4) (Six et al., 2000a; Jastrow y Miller, 1997).

6. Factores que influyen en la formación y estabilización de agregados

Existen agentes de naturaleza diversa que influyen en la formación y estabilización de agregados al actuar como agentes cementantes entre partículas primarias entre sí y con materiales orgánicos. (Six et al., 2000a). Ejemplos de esos agentes son la textura, mineralogía y contenido de materia orgánica presentes en el suelo. Por otro lado, los tamaños y estabilidades de los agregados cambiarán en relación a la profundidad del perfil de suelo, debido a que las concentraciones de los agentes cementantes mencionados cambia en proporción a la profundidad.

Factores extrínsecos, como las actividades agrícolas tienen una gran influencia en el proceso de formación, estabilización y descomposición de agregados, al someter la estructura a fuerzas disruptivas que resultan en la ruptura de los macroagregados superficiales (Jastrow y Miller, 1997). Dicha ruptura de agregados otorga una menor oportunidad para la formación de materia orgánica particulada fina proveniente de residuos frescos y por lo tanto, de microagregados estables (Six et al., 2000a).

En suelos tropicales, que en general están dominados por minerales arcillosos de estructura 1:1 (Denef y Six, 2005; Six et al., 2002), hay una influencia positiva de limos y arcillas en la formación de agregados, y su estabilidad depende principalmente de los sesquióxidos de aluminio (Barthès et al., 2008). En estos ambientes se ha notado también que la protección de la materia orgánica dentro de los agregados no es su principal mecanismo de estabilización, comparado a lo

que ocurre en ambientes templados (Barthès et al., 2008; Six et al., 2002; Golchin et al., 1997).

6.1. Textura

La textura se refiere a la proporción y distribución de las partículas minerales primarias contenidas en el suelo (Duchaufour, 1978). El grado de agregación de un suelo es altamente dependiente de su textura (Baver, 1952).

Feller y Beare (1997) denominan suelos de baja estabilidad a suelos de textura gruesa, mientras que suelos ricos en limos y arcillas, como de alta estabilidad. Lo anterior, debido a que los suelos que contienen un alto porcentaje de arenas y en los que la materia orgánica es el principal agente encargado de la unión de partículas son incapaces de formar altos porcentajes de agregados estables. Por el contrario, suelos de texturas finas se reconocen por presentar mejores niveles de agregación (Christensen, 2001), relacionado no directamente con altos contenidos de minerales, sino con la capacidad que presenten para interactuar con residuos vegetales o agentes cementantes derivados de la actividad microbiológica (Denef y Six, 2005; Golchin et al., 1997).

En diversos estudios se han encontrado mayores proporciones de partículas de limos y arcillas asociadas a los microagregados y de arenas asociadas a macroagregados (Denef y Six, 2005; Six et al., 2000a; Six et al., 2000c; Golchin et al., 1997; Jastrow y Miller, 1997). Sin embargo, en suelos de ambientes tropicales, esta relación no siempre se cumple, ya que al llevar a cabo un estudio para encontrar la influencia de la textura, materia orgánica y sesquióxidos en la estabilidad de agregados en suelos del Brasil, se encontró una correlación positiva de los macroagregados con la cantidad de limos + arcillas contenida en el suelo y negativa con el contenido de arenas (Barthès et al. 2008).

6.2. Mineralogía

Las arcillas alúminosilicatadas y otros compuestos de tamaño similar, como óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio proporcionan la superficie específica más significativa a la que se puede unir la materia orgánica coloidal y minerales para la formación de agregados del suelo (Lutzow et al., 2006). Las características específicas de las arcillas van a determinar la capacidad que presenten para formar agregados.

Se ha documentado por diversos autores que en suelos con arcillas de estructura 1:1, predominantes en ambientes tropicales, y en los que la formación de agregados no es dependiente de la materia orgánica, las atracciones electrostáticas entre partículas de limos y arcillas y óxidos de hierro y aluminio son de mayor importancia en la formación y estabilización de agregados (Barthes et al., 2008; Deneff y Six, 2005; Six et al., 2002; Feller y Beare, 1997). Suelos con esta mineralogía presentan una mayor proporción de agregados estables en agua con relación a los que se presentan en suelos dominados por arcillas de estructura 2:1 e incluso con mineralogía mixta (Six et al., 2002).

Por otro lado, en suelos dominados por arcillas del tipo 2:1 los procesos biológicos para la formación de agregados son más efectivos, ya que la materia orgánica actúa como el principal agente cementante para la formación de micro y macroagregados, al ser polivalente y tener una gran superficie de unión a las arcillas cargadas negativamente (Deneff y Six, 2005; Six et al., 2000b).

6.3. Materia orgánica

La materia orgánica del suelo, además de actuar como reservorio de nutrientes y energía, previene su erosión, mediante la formación de complejos órgano-

minerales (Christensen, 2001), proceso que es denominado como transitorio y depende de un continuo aporte de materia orgánica al suelo (Golchin et al., 1997). La velocidad y calidad de materia orgánica aportada al suelo depende de diversos factores extrínsecos, como temperatura y precipitación, tipo de vegetación, la geoforma, tipo de suelo y prácticas de manejo. En el transcurso de su descomposición, cuya velocidad está influenciada también por factores climáticos y las asociaciones físicas o fisicoquímicas que pueda entablar con componentes minerales (Jastrow y Miller, 1997), los productos orgánicos provenientes de este proceso así como productos orgánicos resultantes del metabolismo microbiano se asocian íntimamente con la fase mineral, contribuyendo de esta manera a la formación y estabilización de agregados (Angers y Chenu, 1998).

Las raíces influyen en la formación de agregados de forma física, al (i) ejercer presión lateral, induciendo compactación y (ii) al remover agua constantemente durante la transpiración vegetal (Six et al., 2002). Mas aún, la exudación de raíces y su continua muerte así como su incorporación al suelo promueven la actividad biológica, comprendida por diversas especies de protozoarios, bacterias, hongos y pequeños artrópodos, los cuales son capaces de unir las partículas del suelo mediante diversos mecanismos, como adsorción y cementación por productos mucilaginosos excretados (Hillel, 1998; Jastrow y Miller, 1997;).

Al llevar a cabo una datación del carbono presente en macro y microagregados, Six et al., (1998), encontraron que el carbono contenido en los microagregados es de una mayor antigüedad, en relación con el que está dentro de los macroagregados. Lo anterior, se atribuye al sistema jerárquico de formación de agregados, en que la materia orgánica presente en los agregados de tamaño mayor se degradada en un tiempo relativamente corto debido a la actividad biológica y pasa a ser constituyente de microagregados, dentro de los cuales la actividad biológica es reducida (Six et al., 2000a). El mismo sistema jerárquico de formación de agregados sugiere que los macroagregados contendrán una mayor proporción de carbono orgánico comparado con los microagregados, debido a que

los primeros representan una suma de la materia orgánica contenida en los segundos así como materia orgánica que funciona como agente de unión y materia orgánica libre (Jastrow y Miller, 1997).

Entonces, las uniones órgano-minerales desempeñan el papel más importante en la protección de la MOS durante el proceso de agregación en suelos con minerales de estructura 2:1 (Lutzow et al., 2006), ya que en suelos dominados por arcillas como la kaolinita, la estabilización de la materia orgánica está más relacionada con su unión a sesquióxidos de aluminio y hierro que a la protección física brindada por la agregación (Barthès et al., 2008).

6.4. Profundidad del perfil

La estabilidad de los agregados depende del tipo de suelo y por lo tanto, de sus propiedades. La variación en la estabilidad también depende de la profundidad del perfil. Tal estabilidad tiende a ser mayor en el horizonte subsuperficial que en el superficial, debido, por un lado a que los primeros horizontes se encuentran sometidos a presiones ambientales tales como el impacto de las gotas de lluvia, periodos de humectación y secado, congelamiento y descongelamiento (Denef et al., 2001; Six et al., 2000). El impacto de las gotas de lluvia influye en la ruptura de agregados debido a que algunos de los agentes encargados de mantener unidas las partículas del suelo son solubles en agua, por lo que al entrar en contacto con este elemento se disuelven, provocando la separación de agregados (Kemper y Rosenau, 1986). Además, la lluvia provoca una rápida humectación de agregados, lo cual lleva a que el aire que se encuentra en el espacio poroso dentro de los agregados sea rápidamente desplazado por el agua, provocando el entallamiento de los agregados (Baver, 1952). Los ciclos de humectación/secado y congelamiento/descongelamiento influyen también en relación al desplazamiento del aire por agua. Además, tales ciclos aumentan la velocidad de descomposición de la materia orgánica, por lo que el proceso de formación/desintegración de

agregados también se acelera, pero con una estabilidad baja (Denef et al., 2001). Por otro lado, el cambio en el tamaño y estabilidad de agregados se relaciona también con el hecho de que al aumentar la profundidad, hay una menor cantidad de materia orgánica en el suelo y ésta última se ha reconocido como el factor más importante en la formación de macroagregados (Onweremadu et al., 2007). La formación de agregados a mayores profundidades va a estar determinada más por las propiedades químicas de los minerales primarios que por la materia orgánica (Kay, 1997).

En suelos tropicales, donde los sesquióxidos son importantes agentes de unión, la lluvia provoca su migración dentro del perfil. Suelos de textura fina pueden retener entre sus estratos moléculas de agua, provocando un hinchamiento en la época de lluvias y encogimiento cuando esta agua se pierde, por lo que los agregados están en constante formación y desintegración (Duchaufour, 1978).

CAPITULO III

CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

1. Localización

El presente estudio se llevó a cabo en la finca cafetalera “Monte Carlo”, situada a $15^{\circ}59'35''N$ y $96^{\circ}06'20''W$, en el municipio de Santa María Huatulco, en la Sierra Sur del estado de Oaxaca (Figura 3.1).

El estado de Oaxaca se localiza en la porción sureste de la República Mexicana, comprende una superficie de $93\,343\text{ km}^2$, que representa 4.8% de la superficie total del país y es reconocido como el quinto estado mas grande del territorio nacional. Limita el norte con los estados de Puebla y Veracruz, al este con el estado de Chiapas, al sur con el Océano Pacífico y al oeste con el estado de Guerrero. Se divide en 570 municipios, agrupados en 30 distritos y estos a su vez en ocho regiones (INEGI, 2005; INEGI 2000).

2. Fisiografía

La provincia fisiográfica de la Sierra Madre del Sur se extiende más o menos paralela a la costa del Océano Pacífico, desde Nayarit hasta Oaxaca, donde abarca aproximadamente el 79% del territorio estatal. Tiene una longitud aproximada de 1, 200 km y un ancho promedio de 100 km (INEGI, 2005).

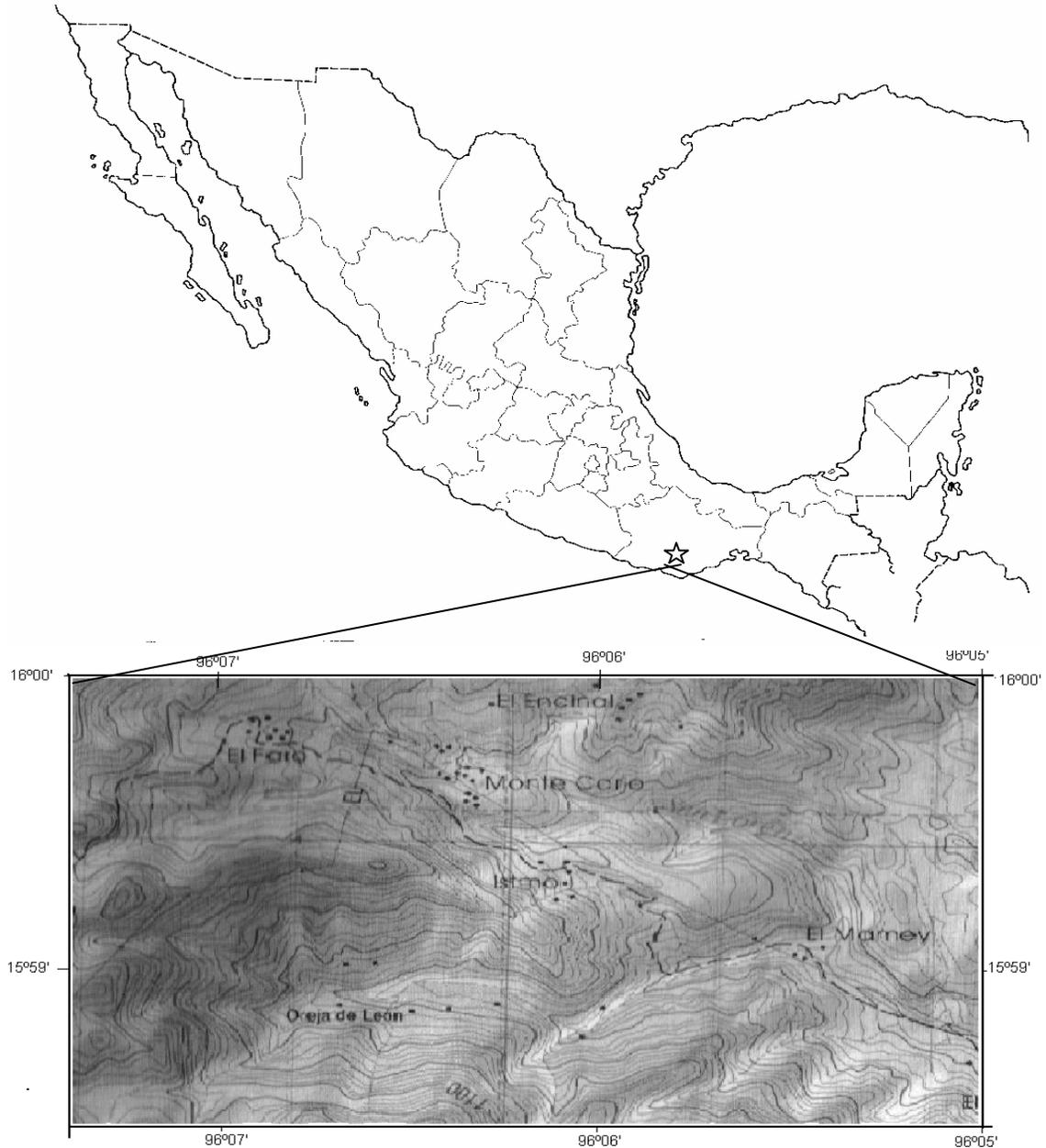


Figura 3.1. Ubicación de la zona de estudio. Modificado de INEGI, 2000

La Sierra Sur de Oaxaca colinda al norte con la Planicie Costera del Golfo; al este, con la frontera de Chiapas; al oeste con la Depresión Ístmica y al sur, con la Planicie Costera de Tehuantepec. Posee regiones fisiográficas con una gran variedad de relieves, los cuales abarcan planicies, valles, depresiones, llanuras, lomeríos y montañas que están sujetas a una alta actividad sísmica, como ocurre

en toda la SMS. Las cumbres de la sierra alcanzan su máxima altura en el Cerro Nube, que se eleva hasta los 3720 msnm (INEGI, 2005; Ortiz et al., 2004).

Los sitios de estudio se localizan en el Cerro Lobo, dentro de la Sierra Sur de Oaxaca, con pendientes de aproximadamente 20% y que están orientadas principalmente hacia el Sur.

3. Geología

La compleja evolución geológica del estado de Oaxaca tiene más de mil millones de años de historia y comprende al menos tres periodos de invasión por el mar, además de una intensa actividad volcánica y la formación de cadenas montañosas asociadas a grandes movimientos tectónicos que ocurrieron hace unos 65 millones de años. Las rocas más antiguas corresponden a rocas metamórficas que se encuentran en la porción centro y norte y provienen del Precámbrico (Centeno-García, 2004).

En la Sierra Sur de Oaxaca predominan las rocas ígneas intrusivas y extrusivas, todas ellas, del Paleozoico Metamórfico. También se encuentran rocas sedimentarias y metamórficas del Cretácico y Jurásico (Centeno-García, 2004; Ortiz, 2004; INEGI, 1998).

En los sitios de estudio se encuentran rocas ígneas intrusivas del Cretácico Inferior y Jurásico. También rocas sedimentarias calizas calizas del Cretácico Inferior (INEGI, 1998).

4. Suelos

Los grupos de suelo más abundantes en el estado de Oaxaca, según el INEGI (2005), son los siguientes: Acrisol, Arenosol, Cambisol, Castañozem, Phaeozem, Fluvisol, Gleysol, Litosol, Luvisol, Nitosol, Planosol, Regosol, Rendzina, Solonchak, Vertisol y Xerosol.

En la provincia fisiográfica de la Sierra Sur, los suelos predominantes son Acrisoles, Arenosoles, Cambisoles, Fluvisoles, Litosoles, Luvisoles y Regosoles (INEGI, 1998).

Un estudio de diversidad de suelos llevado a cabo en una finca cafetalera de la Sierra Sur de Oaxaca y que se considera posee un paisaje típico de la región, arrojó los siguientes grupos de suelo: Alisol Arénico, Alisol Húmico, Alisol Úmbrico, Cambisol Mólico y Umbrisol Arénico, los cuales contienen arcillas de mineralogía 1:1 en sus dos horizontes superficiales (García-Calderón et al., 2006). Por otro lado, Krasilnikov et al. (2005) en la finca cafetalera “La Cabaña”, también perteneciente a la Sierra Madre del Sur encontraron suelos con alto, moderado y bajo desarrollo, representados por Alisoles, Phaeozems Lúvicos y Phaeozems Flúvicos, respectivamente.

Para las zonas de estudio específicas, Kurzmeier y Wiedenmann (2006) describieron para el sitio uno Alisol Úmbrico Cutánico y Phaeozem Lúvico Léptico en el sitio dos. Ambos grupos de suelo se caracterizan por tener un horizonte superficial con altos contenidos de materia orgánica, seguido de un horizonte de acumulación de arcillas, debido principalmente a procesos de iluviación. La diferencia entre ellos se basa principalmente en el espesor de los horizontes superficiales, el contenido de materia orgánica y el porcentaje de saturación de bases (FAO, 2006).

5. Clima

El estado de Oaxaca presenta una gran variedad de climas, debido a su posición geográfica, complejo relieve, efecto de las corrientes marinas, y el rango altitudinal en que se encuentra, entre otras características (Trejo, 2004). En gran parte de la región prevalecen los climas cálidos y semicálidos, subhúmedos; en ciertas zonas elevadas los climas son semisecos, semicálidos y templados, en tanto que en el oriente, cerca de la llanura costera del Golfo Sur, hay importantes áreas montañosas húmedas cálidas y semicálidas (INEGI, 2005).

La Sierra Sur de Oaxaca tiene influencia de circulaciones monzónicas, la circulación del oeste y corrientes de chorro y el paso de ciclones que se desarrollan sobre el Pacífico, lo cual provoca una temporada húmeda de mayo a octubre y una seca, de noviembre a abril (Trejo, 2004).

La estación meteorológica más cercana a la Finca Monte Carlo se encuentra menos de 100 kilómetros de distancia, en Salina Cruz. Para esta estación, y según el sistema de clasificación de Köppen modificado por García, el clima es $Aw_0(w)ig$ (Figura 3.2). Clima cálido subhúmedo con régimen de lluvias en verano y variación de la temperatura anual menor a 5°C ; marcha anual de la temperatura tipo Ganges (INEGI, 2005; García, 1973).

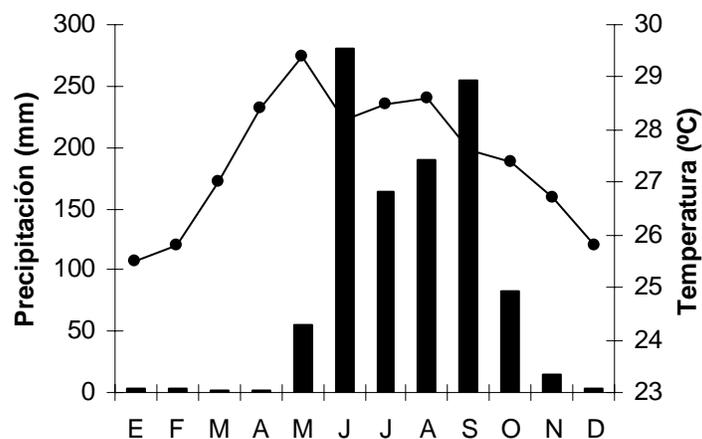


Figura 3.2. Climograma de la estación Salina Cruz

6. Vegetación

Las mismas características que son responsables de la gran variedad de climas encontrados en el estado de Oaxaca, son responsables también del establecimiento de un muy variado tipo de comunidades vegetales. Torres-Colín (2004), llevó a cabo una asociación de las diferentes comunidades vegetales obtenidas a partir de trabajo de campo y de una búsqueda de información en trabajos previos, reconociendo 26 tipos de vegetación agrupados en bosques, matorrales, selvas, vegetación acuática y otras.

Específicamente, el área de estudio se encuentra dentro de un bosque tropical subcaducifolio. En este tipo de vegetación se agrupa una serie de comunidades vegetales con características intermedias en su fisonomía y en sus requerimientos climáticos entre el Bosque Tropical Perennifolio y el Bosque Tropical Caducifolio. Cuando menos la mitad de los árboles encontrados en este bosque deja caer sus hojas durante los meses de sequía, pero hay muchos componentes siempre verdes y otros que solo se defolian durante un periodo de unas cuantas semanas. Prospera en México en altitudes entre 0 y 1 300 msnm. Su altura oscila entre 15 y 40 metros, y pueden distinguirse dos estratos arbóreos, el arbóreo inferior mide comúnmente 8 a 15 metros de alto que se encuentra con frecuencia bien desarrollado, alcanzando más del 50% de cobertura y el estrato arbustivo, que es muy variable en cuanto a su composición. Se encuentran también trepadoras leñosas, de la familia Bignoniaceae, y epífitas, como bromeliáceas y orquidáceas. Entre la fauna representativa, se encuentran aves, reptiles y pequeños mamíferos, como liebre (*Lepus capensis*), rata almizclera (*Ondatra zibethicus*), venado cola blanca (*Odocoileus virginianus*), coyote (*Canis latrans*), y ocasionalmente puma (*Felis concolor*) y jaguar (*Panthera onca*) (Rzedowzky, 1978).

Los dos sitios de estudio tienen diferente composición, diversidad y riqueza vegetal, pero ambos pertenecen a un bosque tropical subcaducifolio y fueron catalogados como bosque secundario por Kurzmeier y Wiedenmann (2006), al

encontrarse arbustos de café actualmente no productivos a la sombra de los árboles nativos del bosque y de solo una especie exótica (*Citrus aurantium*). El sitio dos soporta un bosque considerablemente más diverso y productivo (en términos de altura de árboles y producción de madera), conteniendo 19 familias y 30 especies, que el desarrollado sobre el sitio uno, en el que se encontraron 13 familias y 17 especies. Las cinco familias más dominantes en el sitio 1 corresponden a Leguminosae, representada por tres especies: *Inga punctata*, *Inga oerstediana* y *Senna sp.*; Sapindaceae, con solo una especie (*Cupania dentata*) Lauraceae, con la especie *Ocotea sinuata*; Cecropiaceae (*Cecropia obtusifolia*) y Boraginaceae (*Boufferea andrienxi*). Por otro lado, en el sitio 2 las familias más representativas, en orden de dominancia son Sapindaceae, representada por las especies *Cupania dentata* y *Thouinidium decandrum*; la familia Flacourtiaceae, representada por *Lunania mexicana*, *Casearia sp.* y *Laetia thannia*; las especies *Inga punctata*, *Lonchocarpus sp.*, *Platymiscium jejunum* y *Albizia adinocephala* componen la familia Leguminosae. La familia Apocynaceae se encuentra conformada por la especie *Alstonia longifolia* y, por último la familia Meliaceae, se compone de las especies *Cederla oaxacensis*, *Trichilia havanensis*, *Guarea sp.* y *Trichilia sp.*

CAPITULO IV

MATERIAL Y METODOS

1. Establecimiento de los sitios de muestreo

Los sitios de estudio se localizan dentro de la Finca Monte Carlo, donde se establecieron parcelas de 1 hectárea cada una. Los criterios de selección fueron la presencia de diferentes grupos de suelo, con diferencias en diversidad vegetal y que se encontraran a una misma altitud (comprendida entre 800 y 1,200 msnm). Dentro de cada hectárea se establecieron tres cuadros de 25 × 25 m representativos de las condiciones de cada hectárea (Kursmeier y Wiedenmann, 2006). En cada cuadro se tomaron 3 muestras de suelo y de mantillo. Los criterios empleados para la toma de muestra fueron la dirección de la pendiente hacia el sur y una distancia de 5m entre cada punto de muestreo. En total se obtuvieron nueve muestras por grupo de suelo. La figura 4.1 muestra la ubicación de los sitios de muestreo.

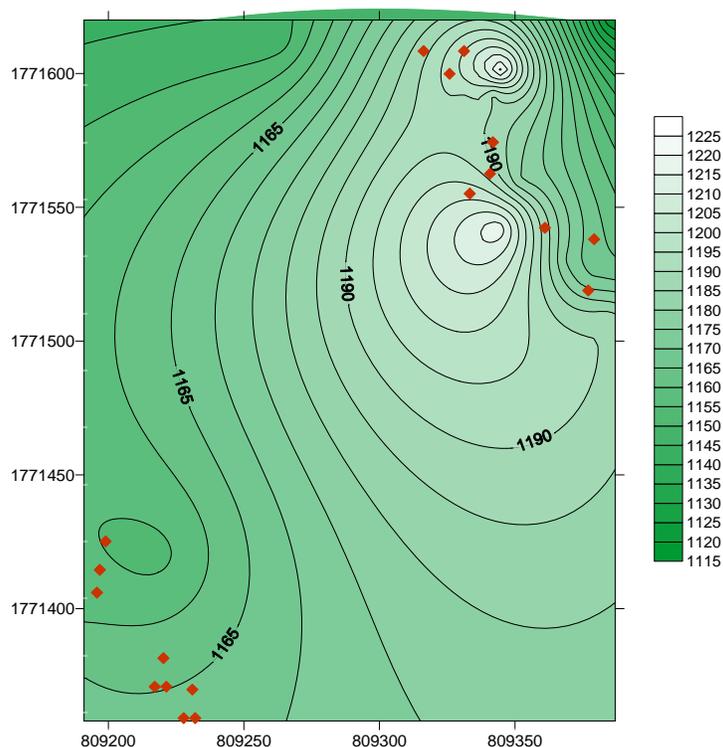


Figura 4.1. Ubicación de los sitios de muestreo

2. Muestreo del mantillo forestal

El mantillo se colectó en un área de 625 cm², delimitada por un cuadro rígido de 25 centímetros por lado. Al pie de cada cuadro se hizo un pequeño perfil para determinar la existencia de los horizontes del mantillo orgánico, basándose en las características del material vegetal presente en cada uno de ellos (Siebe et al., 1996). Se separaron los horizontes Oi y Of y se determinó su espesor, mediante el uso de una cinta métrica. Posteriormente, se marcó el área interna del cuadro rígido con una navaja de campo (Figura 4.2). Después, se tomó la muestra del horizonte Oi y se colocó en doble bolsa previamente rotulada con datos que indican el sitio, número de muestra, horizonte y fecha de muestreo. Una vez retirado de esa superficie todo el horizonte Oi, se procedió a tomar la muestra del horizonte Of, lo cual se realizó con ayuda de una brocha para retirar la mayor cantidad de muestra posible; las muestras fueron igualmente colocadas en doble bolsa rotulada.



Figura 4.2. Muestreo del mantillo forestal

3. Muestreo de suelo

El muestreo del suelo se basó en la toma de muestras del horizonte A, a profundidades que oscilaron entre 0 a 10 y 10 a 20 centímetros, aproximadamente, debido a la presencia de los horizontes A₁ y A₂. La separación de horizontes se llevó a cabo tomando en cuenta las características morfológicas que se basaron en cambios apreciables en la estructura del suelo, así como cambios en el color. Posterior a la separación de horizontes, se realizó la descripción morfológica de los perfiles de suelo, con base a Siebe et al. (1996). En campo, se determinó la humedad y el pH de cada horizonte, con el uso de un medidor de humedad y pH del suelo marca Kelway. Una vez hecha la descripción morfológica, se tomaron muestras para densidad aparente con un cilindro de volumen conocido. Las muestras se colocaron en bolsas individuales previamente rotuladas. Posteriormente se colectaron aproximadamente 500 gramos de suelo con la menor alteración posible en envases de plástico etiquetados con los mismos datos que para el mantillo. Una vez tomada la muestra, los envases se sellaron y guardaron en bolsas de plástico por separado.

4. Metodología de laboratorio

Todas las muestras obtenidas fueron transportadas al laboratorio de Edafología de la Facultad de Ciencias de la UNAM para su posterior análisis

Las muestras de mantillo fueron sometidas al siguiente tratamiento previo a su análisis: obtener su peso para ser secadas posteriormente a 60°C hasta peso constante; estos datos fueron utilizados para determinar el porcentaje de humedad de cada muestra. A continuación, las muestras fueron molidas utilizando un molino de café casero.

4.1. Análisis de mantillo

4.1.1. Análisis físicos

- Humedad (van Reeuwijk, 2002). Con los pesos obtenidos al llevar a cabo el pretratamiento, se determinó el porcentaje humedad empleando la siguiente fórmula:

$$\% \text{ de humedad} = \left[\frac{A-B}{B} \right] \times 100$$

Donde:

A = Peso del mantillo húmedo

B = Peso del mantillo seco a 60°C

4.1.2. Análisis químicos

- pH, en una relación 1:25 mantillo: agua y mantillo: KCl 1N. Según Jackson (1982), se añadieron 25 ml de solución (agua o KCl) a 1 g de mantillo seco y molido y las muestras se agitaron durante dos horas, luego de las cuales se llevó a cabo la determinación de pH utilizando un potenciómetro Corning Modelo 7, con electrodo combinado de cristal.

- Sodio y potasio solubles. Determinación por flamómetro (Corning 400). Su determinación se llevó a cabo empleando el filtrado proveniente de las soluciones de pH (Wilde et al., 1979).

- Pérdida por ignición (Wilde et al., 1979). Una cucharada de mantillo seco (equivalente a aproximadamente 25 g) y molido se colocó en un crisol tarado y se sometió a una temperatura de 105°C durante toda la noche.

- Una vez a peso constante se pesó el crisol y a continuación se colocó en una mufla durante 4 h a 450° C

- El porcentaje de pérdida por ignición se calculó con la siguiente fórmula:

$$\% \text{ PI} = \frac{p1 - p2}{p1} \times 100$$

Donde:

PI = Porcentaje de Pérdida por ignición

p1 = Peso del mantillo seco a 105°C

p2 = Peso del mantillo seco a 450°C

- Sodio y potasio totales. Determinación por flamómetro (Corning 400), empleando las soluciones obtenidas de disolver un gramo de cenizas derivadas de la prueba de pérdida por ignición; en HCl, para conocer el contenido total de estos elementos (Wilde et al., 1979).

4.2. Análisis de suelo

4.2.1. Análisis de las muestras de densidad

- Humedad total del suelo. Método gravimétrico (van Reeuwijk, 2002). Cada una de las muestras de los cilindros para densidad fue pesada en balanza analítica para secarla después a 105°C durante 24 horas y obtener así el peso seco. El porcentaje de humedad total se obtuvo empleando la siguiente fórmula:

$$\% \text{ de humedad} = \left[\frac{A - B}{B} \right] \times 100$$

Donde:

A = Peso del suelo húmedo

B = Peso del suelo seco a 105°C

- Densidad aparente. Método del cilindro (Blake y Hartge, 1990). Los datos empleados para la determinación de humedad se utilizan ahora con la fórmula que se menciona a continuación para calcular la densidad aparente.

$$DA \text{ (g / cm}^3\text{)} = \frac{\text{peso}}{\text{volumen}}$$

Donde:

DA = Densidad aparente

Peso = Peso del suelo seco a 105°C

Volumen = Volumen del cilindro (120 cm³)

4.2.2. Método para manejo de agregados

- Reacción del suelo, mediante la determinación de pH. Método potenciométrico (Van Reeuwijk, 2002). Se determinó en una suspensión de suelo: agua y suelo: KCl, en una relación 1:2.5 empleando un potenciómetro Corning Modelo 7, con electrodo combinado de cristal.

- Contenido de carbono orgánico total (COt). Método de Walkley y Black (Nelson y Sommers, 1982). La determinación se realizó en 0.2 gramos de suelo previamente molido en un mortero de ágata y pasado por un tamiz malla 60. Posteriormente, se colocó en un matraz Erlenmeyer, al que se añadieron 5 ml de dicromato de potasio 1N; después, 10 ml de ácido sulfúrico concentrado; se agitó durante 1 minuto y dejó reposar 30', después de los cuales se añadieron 100 ml de agua destilada, 5 ml de ácido fosfórico concentrado y 5 gotas de indicador bariosulfonato de difenilamina; se tituló con sulfato ferroso 0.5N hasta observar un vire de color verde oscuro a verde esmeralda, y calculó el contenido de materia orgánica y carbono. El contenido de carbono orgánico se determinó mediante las siguientes fórmulas:

$$\%MO = \frac{5 - (\text{ml Fe SO}_4 \times N \text{ real})}{\text{gr de la muestra}} \times 0.69$$

Donde:

%MO = Porcentaje de materia orgánica

5 = Dicromato de potasio agregado

ml FeSO₄ = ml de ácido sulfúrico gastados

N real = Normalidad del sulfato ferroso

0.69 = Constante

$$\%C = \frac{\%MO}{1.724}$$

Donde:

%C¹ = Porcentaje de Carbono orgánico

% MO = Porcentaje de materia orgánica

1.724 = Factor de Van Bemmelen

- Separación de fracciones granulométricas (Dixon y White, 1999). Se agitaron 10 gramos de suelo seco sin tamizar en 150 ml de agua destilada durante 24 horas, después de las cuales el suelo se tamizó con una malla de 2mm, la suspensión resultante se volvió a tamizar con un tamiz de .044 mm. de apertura. El material que pasó la malla se centrifugó a 500 y 6000 rpm, para la obtención de limos y arcillas, respectivamente.

- Contenido de carbono orgánico en las fracciones granulométricas (CO_f). Método Walkley y Black (Nelson y Sommers, 1982). La determinación se llevó a cabo en 0.25 g para arenas y 0.05 g para limos y arcillas. Las diferentes fracciones se colocaron en un matraz Erlenmeyer, al que se añadieron 5 ml de dicromato de potasio (K₂Cr₂O₇) 1N; después, 10 ml de ácido sulfúrico concentrado (H₂SO₄); se agitó durante 1 minuto y dejó reposar 30', después de los cuales se añadieron 100 ml de agua destilada, 5 ml de ácido fosfórico concentrado (H₃PO₄) y 5 gotas de indicador bariosulfonato de difenilamina; se tituló con sulfato ferroso (FeSO₄) 0.5N hasta observar vire de color verde oscuro a verde esmeralda. El contenido de carbono se calculó para cada tamaño de partícula, empleando las fórmulas que se mencionan en la página 38.

¹ Los valores de carbono orgánico se reportan en gkg⁻¹, lo cual se obtiene multiplicando el porcentaje de carbono orgánico por diez.

- Estabilidad de agregados (Angers y Mehuys, 1993). 10 gramos de suelo previamente humectado por nebulización con un humificador ultrasónico casero, marca Sun Shine, modelo HUM002, fueron sometidos a tamizado en húmedo en un rotor con movimiento horizontal de 1.5 centímetros, a una velocidad de 35 ciclos/minuto, con tamices de apertura de 2mm y de 250 µm.

- A cada muestra obtenida se le determinó el contenido de arenas al someter los agregados a agitación con hexametáfosfato de sodio al 0.5% y tamizando empleando malla 325.
- La cantidad de agregados estables para cada tamaño de malla (que corresponden a macro y microagregados, respectivamente) se calculó empleando la siguiente fórmula:

$$\%AE = \frac{A - \text{arenas}}{\left(\frac{B}{1 + AG}\right) - \text{arenas}} \times 100$$

Donde:

% AE = Porcentaje de agregados estables en agua

A = Peso de agregados estables en cada tamaño de malla

B = Peso inicial

AG = Contenido de agua gravimétrica (en gg^{-1})

Arenas = contenido de arenas presentes en cada muestra (en g)

5. Análisis estadístico

Se llevaron a cabo análisis de estadística descriptiva para todas las pruebas de laboratorio realizadas para determinar los valores de tendencia central, dispersión y variación de los resultados obtenidos; así como pruebas de T de student para determinar si se presentan o no diferencias significativas entre los sitios de estudio. Para conocer la relación existente entre el porcentaje de agregados estables en agua y la cantidad de arenas y limos + arcillas, así como el contenido de carbono presente en tales fracciones granulométricas, se realizaron análisis de regresión simple y análisis de correlación de Pearson.

Todo lo anterior realizó utilizando los programas EXCEL versión 11.0 y STATISTICA versión 6.0.

CAPITULO V

RESULTADOS

Se establecieron nueve sitios de colecta de mantillo forestal y suelo para cada uno de los sitios de estudio, situados en pendientes orientadas hacia el sur. La totalidad de los sitios localizados sobre el Alisol Úmbrico Cutánico (sitio 1) presentan pendiente con una inclinación aproximada de 20%, mientras los que se encuentran en el Phaeozem Lúvico Léptico (sitio 2) tienen pendientes que van desde el 24 y hasta el 28% de inclinación. Ambos sitios se encuentran en un bosque tropical subcaducifolio con plantas de café actualmente no productivas y que se encuentran ya abandonadas.

En todos los puntos muestreados se encontraron dos horizontes de mantillo forestal, cuyos espesores varían desde 2 y hasta los 4 centímetros para el horizonte O₁ y de 0.5 a 4 centímetros para el O_f. De manera general, para ambos sitios de estudio se reconocieron y muestrearon los horizontes minerales A₁ y A₂, basados en diferencias observables a simple vista y cuyos espesores oscilaron alrededor de los 10 centímetros. Las estructuras reconocidas en campo comprenden principalmente, granular fina y mediana y bloques subangulares medianos de moderado desarrollo. Para el Sitio 1 los colores en húmedo oscilaron entre pardo oscuro a pardo muy oscuro, en ambos horizontes; mientras que en el sitio 2, el color predominante fue pardo oscuro. Las tablas de las características del mantillo forestal así como de la descripción morfológica de los perfiles realizados (Siebe et al., 1996), se incluyen en los anexos 1 y 2.

Se realizó una determinación del contenido de mantillo presente en los sitios al momento del muestreo, siendo el más abundante el Sitio 1. Los porcentajes de humedad oscilaron del 10 al 11%, sin que se mostrara una tendencia general al aumento o disminución de ese valor entre los horizontes orgánicos. El pH del mantillo forestal puede ser considerado como neutro.

Los horizontes minerales presentaron contenidos de carbono orgánico de aproximadamente 50 g/kg en el horizonte A₁ y 30 g/kg en el horizonte A₂. El tamaño dominante de partículas correspondió a la fracción limosa, mientras que

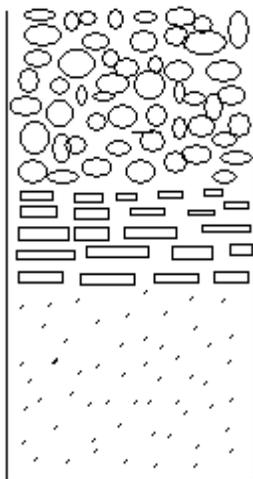
las arcillas presentaron el menor porcentaje, pero el mayor contenido de carbono orgánico. Los microagregados de tamaño mayor a 2 mm tuvieron un mayor porcentaje de estabilidad al someterlos a tamizado en húmedo.

A continuación se detallan los resultados obtenidos para el mantillo forestal y los horizontes orgánicos.

1. Caracterización del mantillo forestal

Ambos sitios de estudio mostraron mantillos bien desarrollados, al presentar dos horizontes orgánicos, OI y Of (Cuadros 5.1 y 5.2).

Para ambos sitios, el horizonte OI tuvo espesores de hasta cuatro centímetros, dentro de los cuales se encontraron restos vegetales y de algunos pequeños moluscos aún sin descomponer, mientras que el horizonte Of alcanzó en algunos perfiles espesores también de hasta cuatro centímetros pero estuvo constituido por restos vegetales que a pesar de su descomposición aún pudo determinarse su origen. En todos casos, éste último horizonte estuvo mezclado ya con el horizonte mineral A.

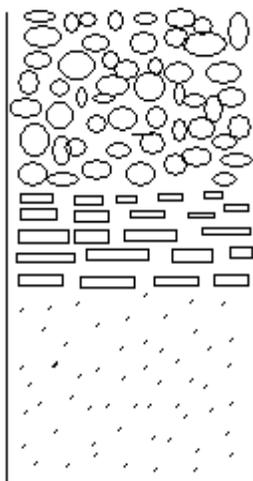


Horizonte **OI**, con espesores comprendidos entre dos y cuatro centímetros. Constituido por hojas de color pardo oscuro reconocibles a simple vista, con poca o nula descomposición; restos de ramas pequeñas y en algunos casos, conchas de pequeños moluscos.

Horizonte **Of**, con espesores de uno a cuatro centímetros. Constituido por restos de materiales orgánicos muy descompuestos, pero cuyo origen se pudo determinar todavía.

Horizonte **A**

Cuadro 5.1. Características del mantillo forestal en el sitio 1



Horizonte **OI**, con espesores comprendidos entre uno y cuatro centímetros. Constituido por hojas de color pardo oscuro reconocibles a simple vista, con poca o nula descomposición; restos de ramas pequeñas y en algunos casos, conchas de pequeños moluscos.

Horizonte **Of**, con espesores de 0.5 a cuatro centímetros. Constituido por restos de materiales orgánicos muy descompuestos, pero cuyo origen se pudo determinar todavía.

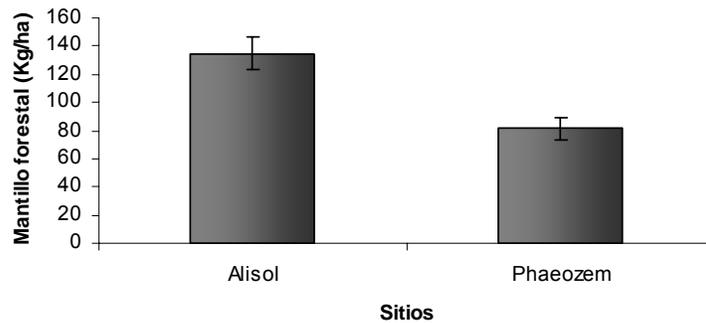
Horizonte **A**

Cuadro 5.2. Características del mantillo forestal en el sitio 2

Se llevó a cabo la estimación de la cantidad de mantillo presente en cada sitio al momento de la colecta, a partir de los pesos de los horizontes OI y Of obtenidos en un área de 625cm² y extrapolarlos a valores de kilogramos × hectárea⁻¹ (Tabla 1). El sitio 1 tuvo una aportación significativamente mayor que la del bosque desarrollado sobre el sitio 2. Los valores corresponden a 13.86 y 81.25 kg·ha⁻¹, respectivamente (Gráfica 1).

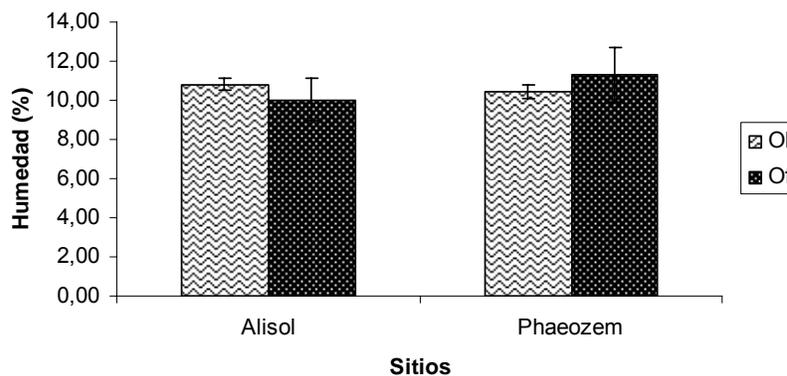
Tabla 1 Características del mantillo orgánico en sitios 1 y 2. Se indican los valores promedio ± una desviación estándar. Para mayores detalles, consultar el anexo 3.

Característica	Hz	Sitio 1	Sitio 2
kg·ha ⁻¹	OI	134.86±70.54	81.25±42.15
	Of	10.81±0.97	10.44±0.95
Humedad (%)	Of	10.03±3.36	11.32±4.16
	OI	6.97±0.37	6.98±0.18
pH (H ₂ O)	Of	6.78±0.22	7.12±0.17
	OI	6.17±0.32	6.68±0.19
pH (KCl)	Of	5.80±0.22	6.36±0.27
	OI	82.17±7.04	79.73±4.28
Pérdida por ignición (%)	Of	54.35±13.85	60.45±11.97
	OI	0.74±0.12	0.76±0.11
Na soluble	Of	0.35±0.12	0.42±0.13
	OI	1.03±0.38	0.86±0.32
Na total	Of	0.98±0.44	0.75±0.40
	OI	2.46±0.73	3.01±0.59
K soluble	Of	0.70±0.21	0.91±0.42
	OI	8.05±3.89	9.22±4.06
K total	Of	2.23±1.02	2.92±1.35



Gráfica 1. Mantillo forestal presente en cada sitio al momento del muestreo

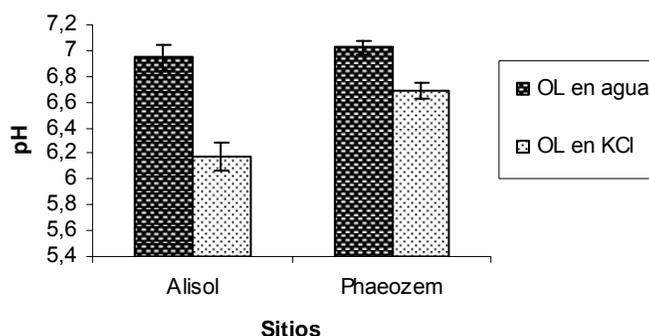
En la gráfica 2 se hace una comparación de los porcentajes de humedad que presentaron ambos sitios de estudio en los dos horizontes del mantillo. Se observa que no hay una tendencia general de conservación de humedad mayor en alguno de los dos horizontes orgánicos muestreados. Por otro lado, tales valores promedio de humedad tienen muy poca variación dentro y entre los sitios, ya que se encuentran en porcentajes que van del 10 al 11% (Tabla 1), por lo que no hay diferencias significativas.



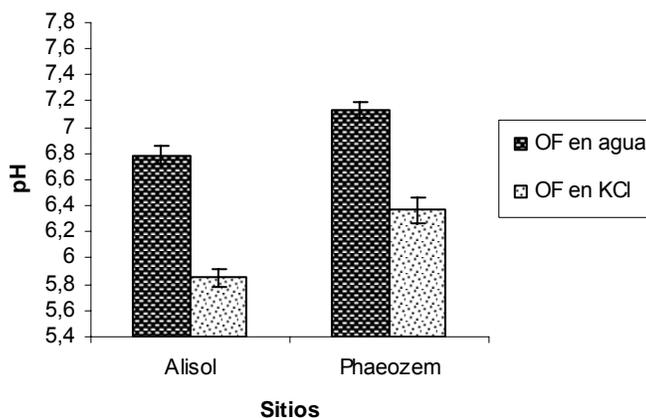
Gráfica 2. Porcentaje de humedad en el horizonte O

La gráfica 3 corresponde a una comparación de los valores de pH obtenidos en los horizontes OI y Of entre ambos sitios de estudio. Se observa que el mantillo situado sobre el Alisol (1) es ligeramente más ácido que el que se encuentra en el sitio correspondiente al Phaeozem (2). Se encontraron diferencias significativas

entre los sitios, relacionadas a los valores de pH obtenidos al realizar la determinación en KCl para ambos horizontes de mantillo. En ambos sitios la tendencia general es de valores más ácidos en el horizonte de fermentación. Se obtuvieron valores en agua de 6.50 a 7.45 y 6.45 a 7.25 en los horizontes Ol y Of, respectivamente, en el sitio correspondiente al Alisol; y de 6.85 a 7.35 y 6.80 a 7.40, en el mismo orden, para el Phaeozem (Tabla 1).



a

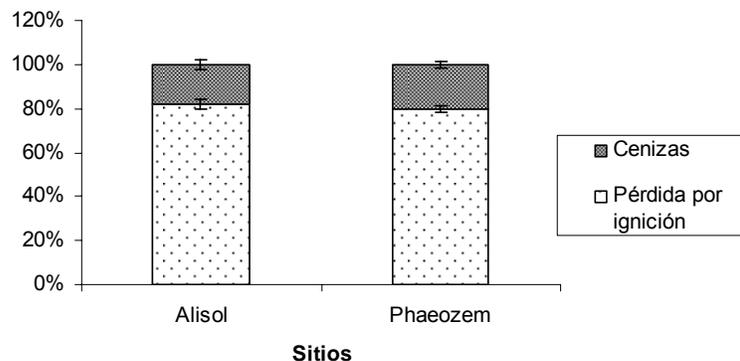


b

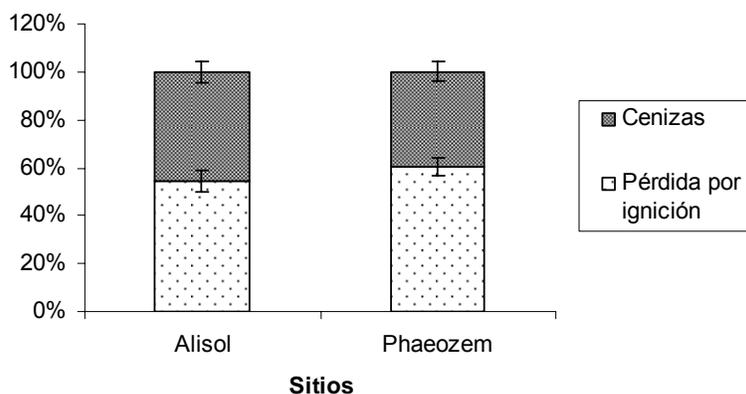
Gráfica 3. pH del horizonte Ol(a) y Of (b)

La prueba de pérdida por ignición arrojó los siguientes resultados (Gráfica 4, Tabla 1): la pérdida por ignición es ligeramente mayor en el sitio 1, que presentó un

porcentaje de 82%, comparado con el sitio 2, el cual fue de 79% en los horizontes OI. Por el contrario, el horizonte Of (gráfica 5) presenta una pérdida por ignición mayor en el Sitio 2 que en el Sitio 1 (60% y 54%, respectivamente). El porcentaje de cenizas resultante es mayor en el horizonte Of en ambos grupos de suelo. No se encontraron diferencias significativas para ninguno de los casos.



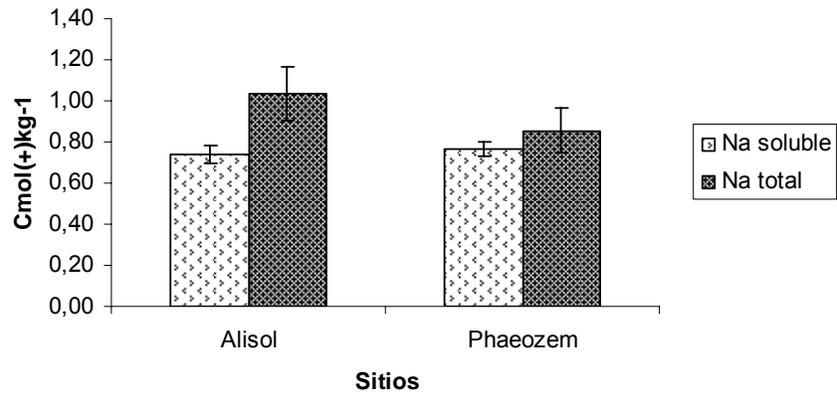
Gráfica 4. Porcentajes de pérdida por ignición en el horizonte OI



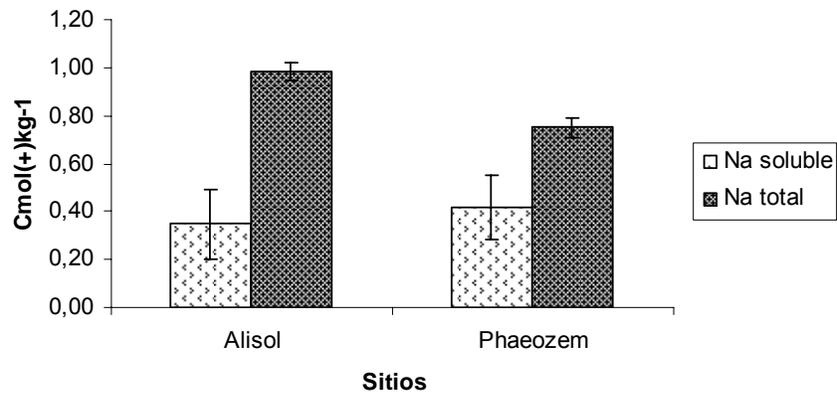
Gráfica 5. Porcentajes de pérdida por ignición en el horizonte Of

En la gráfica 6, se observa que los contenidos de sodio disminuyen en el horizonte de fermentación con respecto al de hojarasca, lo cual es válido tanto para el sitio 1 como para el sitio 2 (Tabla 1). Las concentraciones más altas de este elemento se encontraron en el mantillo forestal colectado en el sitio correspondiente al Alisol,

con valor promedio, en su forma total de $1.03 \text{ cmol}_{(+)}\text{kg}^{-1}$, mientras que en el Phaeozem el promedio obtenido fue de $0.86 \text{ cmol}_{(+)}\text{kg}^{-1}$. Para los valores de sodio soluble, se encontró la misma tendencia de disminución en su concentración al pasar del horizonte Ol al Of. En el Sitio 1 se obtuvieron concentraciones de 0.74 y $0.35 \text{ cmol}_{(+)}\text{kg}^{-1}$ en los horizontes Ol y Of, respectivamente; mientras que para el sitio 2 los valores, en el mismo orden de presentación son de 0.76 y $0.42 \text{ cmol}_{(+)}\text{kg}^{-1}$. No se encontraron diferencias significativas entre los sitios de estudio, tanto en los valores solubles como en los totales. La gráfica 7 nos muestra que, al igual que en el caso de la concentración de sodio en el mantillo forestal, los contenidos de potasio en los horizontes Of, 0.70 y $0.91 \text{ cmol}_{(+)}\text{kg}^{-1}$ obtenidos en su forma soluble para el Sitio 1 y Sitio 2, respectivamente son mucho menores que los valores obtenidos para el horizonte Ol, 2.46 y $3.01 \text{ cmol}_{(+)}\text{kg}^{-1}$, en el mismo orden. Esta vez, lo mayores valores obtenidos corresponden al mantillo colectado en el sitio del Phaeozem, cuyo valor promedio, en su forma soluble, es de $0.91 \text{ cmol}_{(+)}\text{kg}^{-1}$ en el horizonte Ol, en relación al Alisol, cuyo contenido potasio total en el horizonte Ol es de $0.70 \text{ cmol}_{(+)}\text{kg}^{-1}$. Sin embargo, no se encontraron diferencias significativas entre los sitios de estudio en ninguno de los valores obtenidos.

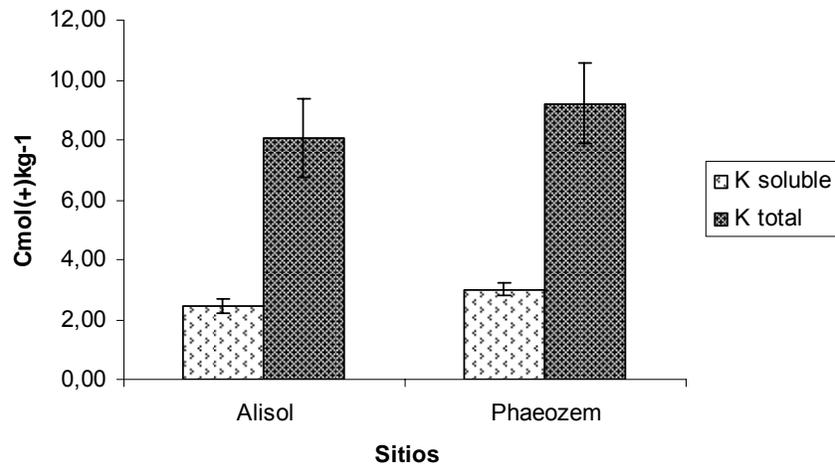


a

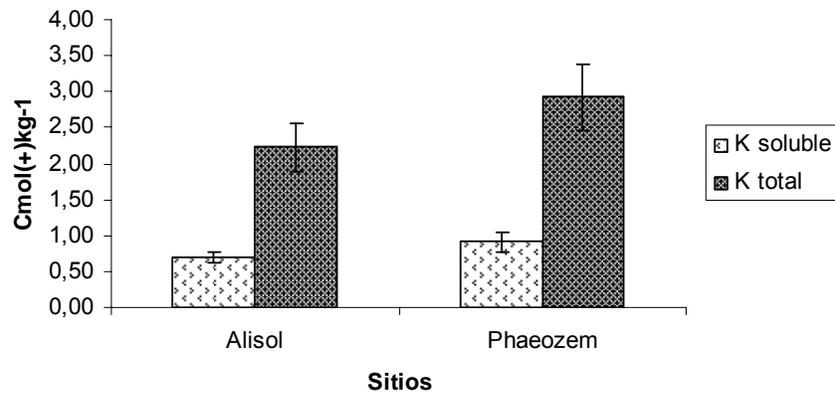


b

Gráfica 6 Concentración de sodio soluble y total. En horizonte OI (a) y Of (b)



a



b

Gráfica 7. Concentración de potasio soluble y total (a), en horizonte OI y (b), horizonte Of

2. Caracterización del suelo

Para ambos grupos de suelo se reconocieron y muestrearon los horizontes A_1 y A_2 , basados en diferencias estructurales observables a simple vista y cuyos espesores oscilaron alrededor de los 10 cm. Las estructuras reconocidas en campo comprenden principalmente, granular fina y mediana y bloques subangulares medianos y pequeños de moderado desarrollo en los horizontes del sitio 1. En el sitio 2, Predomina la estructura granular pequeña y mediana de moderado desarrollo en ambos horizontes. Los colores van de pardo gris oscuro a pardo gris muy oscuro en los horizontes A_1 y pardo oscuro en los horizontes A_2 en el sitio 1. Para el Sitio 2 no hay diferencias de colores al pasar de un horizonte a otro, ya que en ambos se observó un color pardo oscuro. Al realizar las determinaciones de pH en campo, todos los valores fueron de 7; mientras que la humedad osciló entre 55-70% en el primer horizonte y entre 55-80% en el segundo, para el sitio 1. En el sitio 2, se observaron menores porcentajes de humedad, al estar comprendidos entre 30-70% en el horizonte A_1 y entre 30-60% en el horizonte A_2 (para mayores detalles, consultar el Anexo 2).

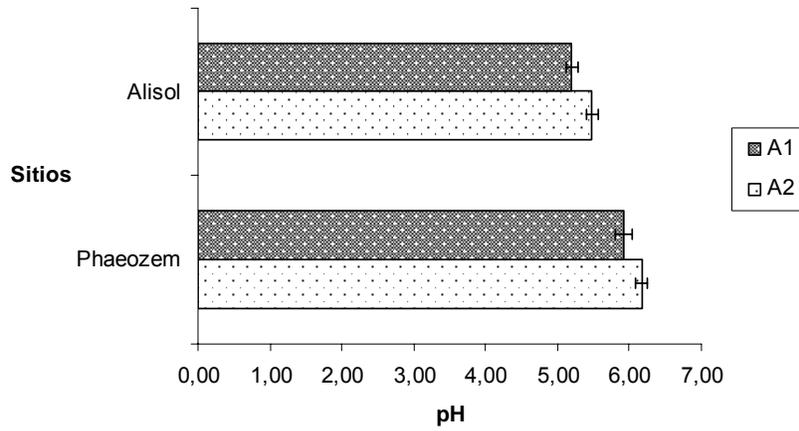
La densidad aparente de ambos sitios tiende a aumentar de manera proporcional a la profundidad de los horizontes. Toma valores promedio, en el sitio 1 de 0.93 y 1.06 g/cm³ en los horizontes A_1 y A_2 , respectivamente. Para el sitio 2, la densidad aparente del horizonte A_1 es de 0.75 y del horizonte A_2 de 0.83 g/cm³.

La tabla 2 muestra un resumen de los valores promedio obtenidos al realizar las diversas pruebas de laboratorio en las muestras de suelo.

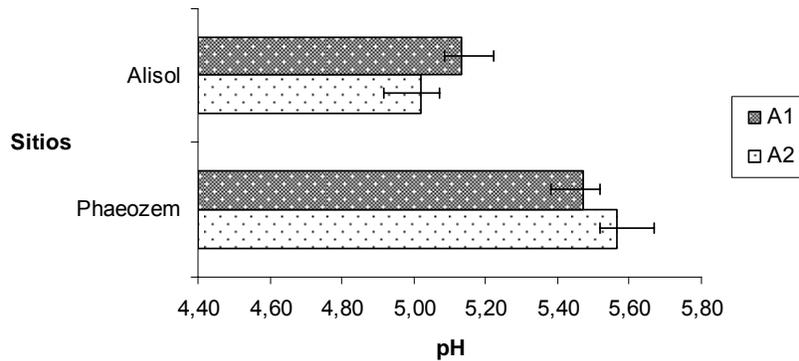
Tabla 2. Características de los horizontes A₁ y A₂ en los sitios 1 y 2. Se muestran los valores promedio ± una desviación estándar. Para mayores detalles, consultar el anexo 3.

Característica		Hz	Sitio 1	Sitio 2
Densidad Aparente (g/cm ³)	A ₁		0.93±0.09	0.75±0.12
	A ₂		1.06±0.14	0.83±0.12
pH (H ₂ O)	A ₁		5.2±0.346	6.05±0.264
	A ₂		5.5±0.281	6.18±0.199
pH (KCl)	A ₁		5.13±0.272	5.47±0.144
	A ₂		5.02±0.311	5.56±0.128
COT (gkg ⁻¹)	A ₁		37.02±11.76	58.81±17.97
	A ₂		19.35±8.27	40.88±25.09
Fracciones (%)	Arenas	A ₁	15±5.95	9.03±1.19
		A ₂	17.22±3.43	9.86±1.18
	Limos	A ₁	75.98±3.73	81.59±3.03
		A ₂	74.18±2.98	78.31±5.92
	Arcillas	A ₁	4.16±0.92	5.86±1.19
		A ₂	4.44±1.53	6.9±1.12
COF (%)	Arenas	A ₁	9.48±1.93	15.46±6.03
		A ₂	7.07±1.13	11.14±6.06
	Limos	A ₁	6.55±2.06	9.14±2.18
		A ₂	5.96±1.98	7.52±3.21
	Arcillas	A ₁	85.74±31.44	88.98±44.54
		A ₂	83.76±44.37	62.66±20.94
Agregados estables en agua (%)	Macroagregados >2000 μm	A ₁	71.85±12.09	76.44±9.85
		A ₂	47.73±16.94	66.68±4.82
	Macroagregados 250-200 μm	A ₁	22.75±15.25	16.37±7.31
		A ₂	35.10±14.18	23.90±11.26
	Microagregados <250μm	A ₁	2.97±1.89	1.06±0.51
		A ₂	6.51±3.76	2.13±1.00

La gráfica 8 muestra que el suelo correspondiente al Alisol es ligeramente más ácido con respecto al Phaeozem y en general, se muestra una tendencia en ambos grupos de suelo a un aumento de los valores de pH al incrementarse la profundidad. Los valores promedio obtenidos en el Alisol van de 5.2 a 5.5 en el horizonte A₁ y A₂, respectivamente, para la determinación de pH activo (en H₂O) y de 5.13 a 5.02 en su valor potencial (en KCl). Por otro lado, los valores del sitio correspondiente al Phaeozem en agua oscilan entre 6.05 a 6.18 en A₁ y A₂, respectivamente; mientras que en KCl fueron de 5.47 y 5.56. Todos los valores de pH muestran diferencias significativas entre ambos sitios de estudio.



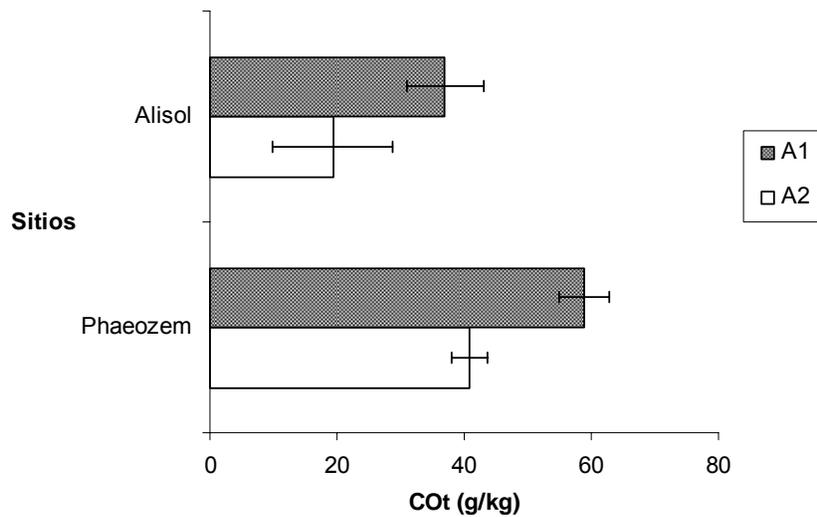
a



b

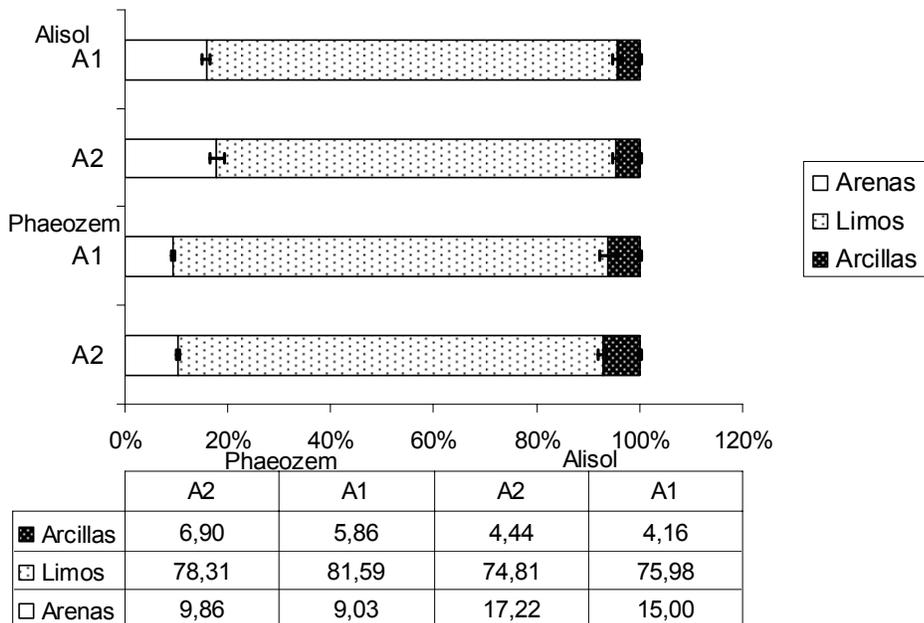
Gráfica 8. Comparación de los valores de pH. (a), en agua y (b), en KCl

La concentración de carbono orgánico total (COt) disminuye al aumentar la profundidad del perfil (Gráfica 9), lo cual se cumple tanto para el Alisol como para el Phaeozem. El Phaeozem presenta los valores de carbono orgánico más altos (58.81 y 40.88 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ en Ah₁ y Ah₂, respectivamente), comparados con el Alisol, cuya concentración es, para el horizonte A₁ de 37.02 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$; mientras que para el horizonte A₂, de 19.35 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. Las diferencias en los contenidos de carbono para ambos horizontes entre los grupos de suelo sí son significativas.



Gráfica 9. Valores de carbono orgánico total

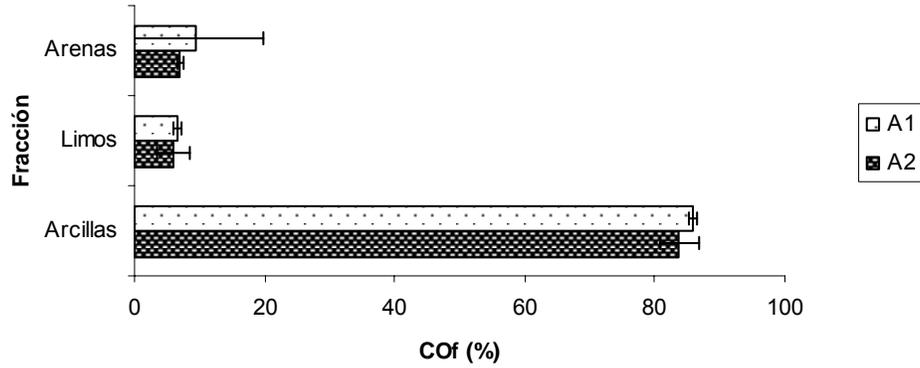
Al llevar a cabo la separación de fracciones granulométricas por el método de fracciones granulométricas dispersables en agua, se obtuvo que, para ambos sitios de estudio los limos representaron la fracción dominante, mientras que arenas y arcillas ocuparon segundo y tercer lugar de dominancia, respectivamente. El sitio 1 tuvo los siguientes porcentajes de partículas primarias: 76% de limos, 15% de arenas y 4% de arcillas. En el sitio 2, siguiendo el mismo orden, los porcentajes son: 82, 9 y 6%. Para los dos casos de estudio, los porcentajes de arenas y arcillas mostraron un aumento en proporción a la profundidad del perfil, mientras que la fracción limosa disminuyó al pasar del horizonte A₁ al horizonte A₂ (Gráfica 10).



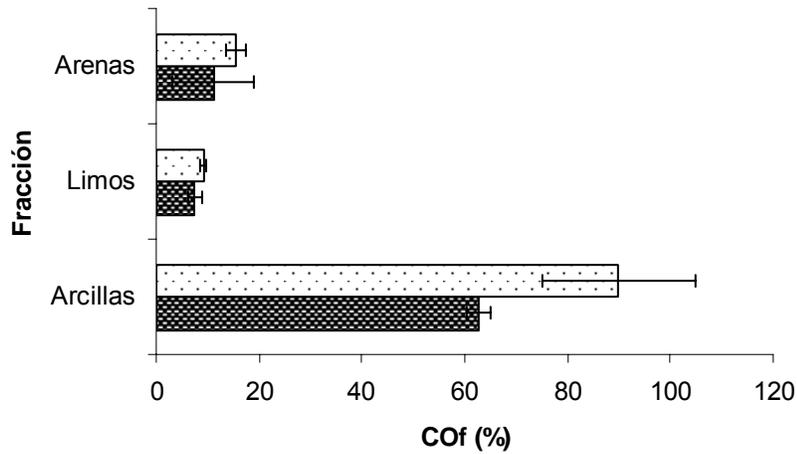
Gráfica 10. Porcentaje de fracciones granulométricas

El sitio 1, presentó un mayor porcentaje de arcillas y limos comparado con los contenidos de tales fracciones en el sitio 2. Se encontraron diferencias significativas en los porcentajes de arenas en el horizonte A₂, el contenido de limos para el horizonte A₁ y en arcillas para ambos horizontes.

Los valores de carbono orgánico presentes en cada fracción granulométrica se presentan en relación al porcentaje que estas fracciones representan en cada muestra de suelo. Es decir, los valores se muestran en porcentaje. De esta forma, las arcillas, a pesar de ser la fracción menos dominante, es la que presenta proporcionalmente la mayor concentración de carbono orgánico, lo cual es válido para ambos sitios de estudio. Contrario a lo que se esperaba, las arenas siguen en dominancia de carbono orgánico y los limos son los que tienen el menor porcentaje (Gráfica 11). Las concentraciones de carbono disminuyen al aumentar la profundidad del perfil.



a



b

Gráfica 11. Concentraciones de carbono orgánico en cada tamaño de partícula (a): sitio 1; (b): sitio 2.

El sitio 1 tiene, para el horizonte A₁, un 85.74% de carbono orgánico asociado a las arcillas del suelo y éste disminuye muy ligeramente al pasar al horizonte A₂, cuyo valor es de 83.76%. Las arenas tuvieron un 9.48% de carbono en el primer horizonte mineral y disminuyeron a 7.07% al aumentar la profundidad del perfil. Por último, los limos tuvieron la menor disminución de porcentaje al pasar de un horizonte a otro, ya que en el primero de ellos se obtuvo un 6.5%, mientras que en el segundo, fue de 5.96%. El sitio 2, por el contrario, presentó una notable

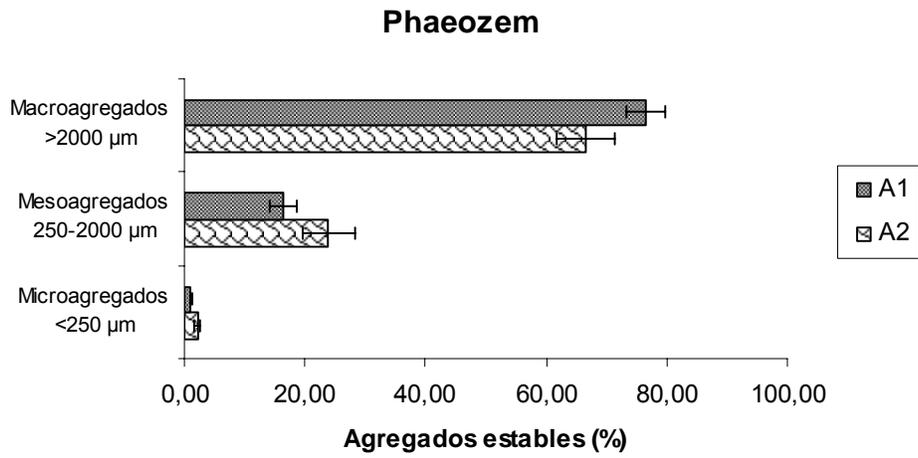
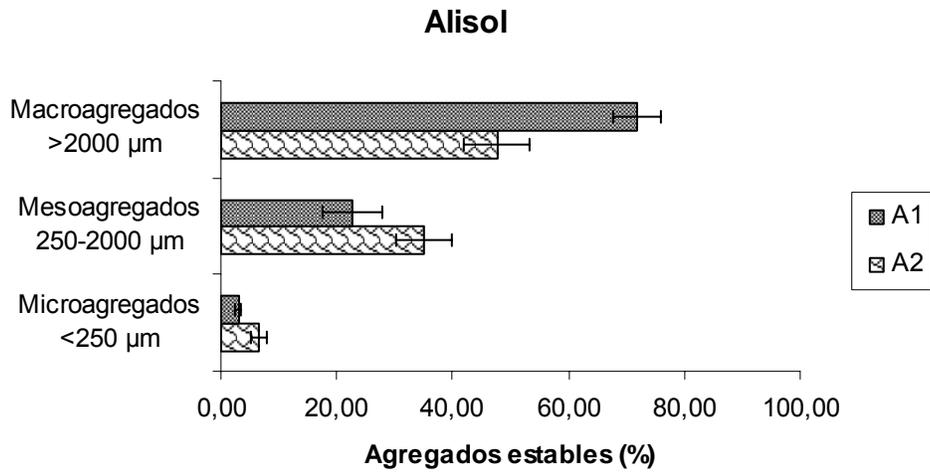
disminución en el porcentaje de carbono orgánico en la fracción arcillosa, al pasar del 88.9% que se encontró en el horizonte A₁, al 62.6% en el horizonte A₂. Los porcentajes de carbono asociado a arenas y limos en el horizonte A₁ son 15.5 y 9.1%, respectivamente; mientras que en el horizonte A₂ y en el mismo orden, los porcentajes son de 11.4 y 7.5%. Solo se encontraron diferencias significativas en los contenidos de carbono orgánico presentes en limos del horizonte A₂ y en arcillas de A₁.

La determinación de agregados estables en agua mostró que el tamaño de agregados dominante en ambos grupos de suelo corresponde a los macroagregados de tamaño mayor a 2000µm, presentando porcentajes de 71.85 y 47.73%, en A₁ y A₂, respectivamente en el sitio 1; y de 76.44 y 66.68% en el sitio 2; seguidos de los macroagregados con tamaños de 250 a 2000 (mesoagregados). Finalmente, el menor porcentaje de agregados estables en agua corresponde a los microagregados (Gráfica 12).

El sitio 1, mostró una disminución en el porcentaje de agregados estables en agua de tamaño mayor a 2000 µm al pasar de 72% en el horizonte A₁ a 47% en el horizonte A₂. Por el contrario, los microagregados (de tamaño entre 250 y 2000 µm, nombrados, en adelante, mesoagregados), al igual que los microagregados aumentaron en porcentaje de manera proporcional a la profundidad. Los mesoagregados aumentaron, de 22.7% a 35.1%. Los microagregados pasaron del 3% al 6.5% en el horizonte A₂.

Al igual que en el sitio 1, la tendencia del sitio 2 correspondió a una disminución en el porcentaje de agregados > 2000 µm del horizonte A₂ con respecto al A₁ (66.7 y 76.4%, respectivamente). Mesoagregados, al igual que los microagregados, aumentaron en porcentaje en el segundo horizonte con respecto al primero.

El sitio 1 tiene un mayor porcentaje de macroagregados >2000 µm comparado con el sitio 2 y menor de mesoagregados y microagregados.



Gráfica 12. Porcentaje de agregados estables en agua

3. Análisis de correlación

A continuación se muestran las correlaciones encontradas en el horizonte A, donde las correlaciones más significativas se obtuvieron entre los tamaños de agregados y el carbono orgánico presente en las arenas, así como con el carbono orgánico total, en lo que respecta al sitio 1. Por otro lado, en el sitio 2 se encontró mayor correlación entre los tamaños de agregados y el carbono orgánico contenido en la fracción correspondiente a limos+arcillas.

Tabla 3. Correlaciones entre los diferentes tamaños de agregados y los contenidos de arenas, limos+arcillas¹, carbono orgánico en arenas (COarenas) y carbono orgánico asociado a limos + arcillas (COlimos+arcillas) en el horizonte A

ALISOL (SITIO 1) Horizonte A			
Variable (%)	Tamaño (µm)		
	Macroagregados > 2 mm	Mesoagregados 250 µm-2mm	Microagregados (<250 µm)
Arenas	.043	-.168	-.173
Limos+arcillas	-.102	.181	.134
CO arenas	.546	-.307	-.406
CO limos+arcillas	-.031	-.066	-.061
COT	-.310	.507	-.404

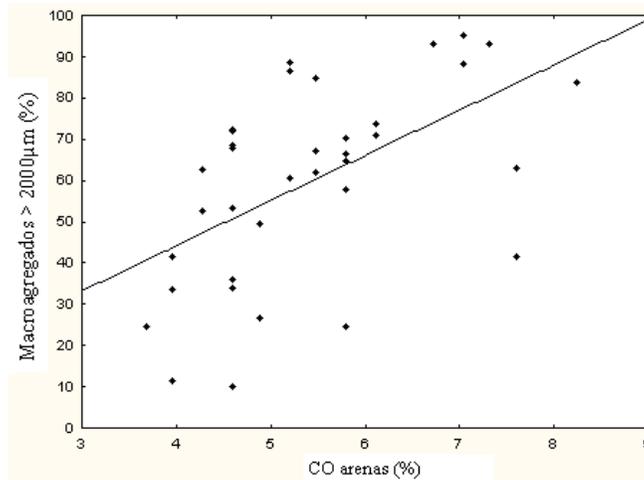
PHAEOZEM (SITIO 2) Horizonte A			
Variable (%)	Tamaño (µm)		
	Macroagregados > 2 mm	Mesoagregados 250 µm-2mm	Microagregados (<250 µm)
Arenas	-.201	.172	.408
Limos+arcillas	.109	.331	-.324
CO arenas	.301	-.227	-.495
CO limos+arcillas	.301	-.445	-.513
COT	.182	-.145	-.252

Los valores en negritas indican significancia a una $p \leq .05$
COT = Carbono orgánico total

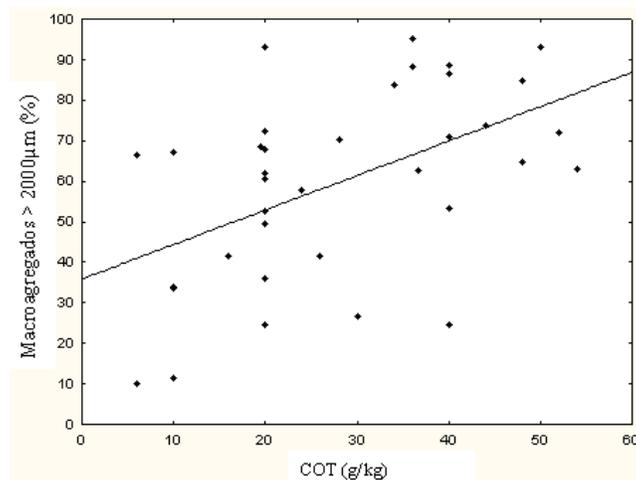
Para el sitio 1, se encontró una correlación moderada positiva entre los agregados de tamaño mayor (>2000µm), y el carbono orgánico contenido en la fracción

¹ Para los fines de este estudio, se juntaron los valores de limos y arcillas y fueron considerados como uno solo debido a la dispersión incompleta de dichas fracciones (ver discusión, página 58).

arenosa del horizonte A. En relación a los mesoagregados, se encontró una correlación moderada positiva con el COT (Tabla 3, Gráfica 13).



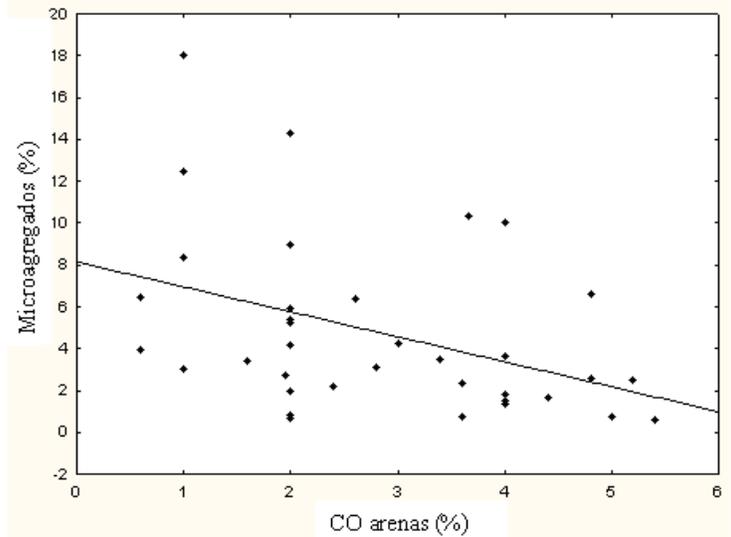
a



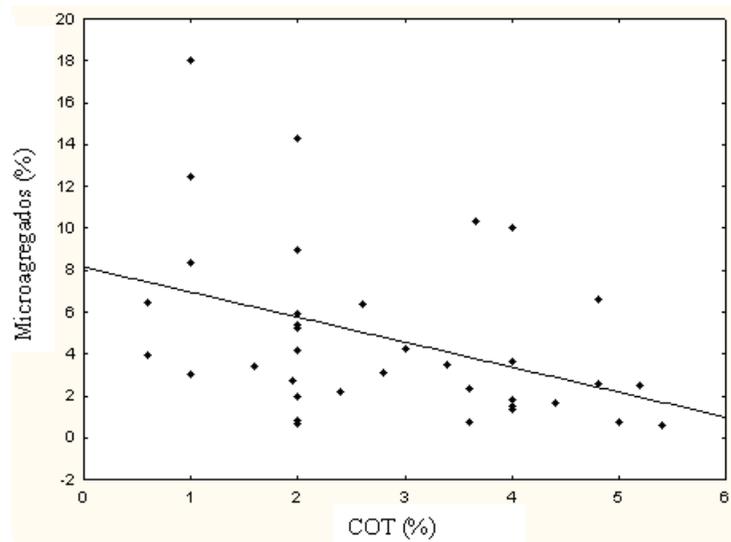
b

Gráfica 13. Correlación entre macroagregados y (a): CO arenas y (b): mesoagregados y COT en el horizonte A del sitio 1

Por otro lado, con respecto a los microagregados, las correlaciones significativas se encontraron con el CO de las arenas así como con el COT. Sin embargo, en ambos casos, las correlaciones fueron moderadas y negativas (-.406 y -.404, respectivamente) (Tabla 3), lo cual significa que al aumentar las concentraciones de carbono tanto asociado a arenas como el total, disminuye el porcentaje de microagregados estables en agua (Gráfica 14).



a

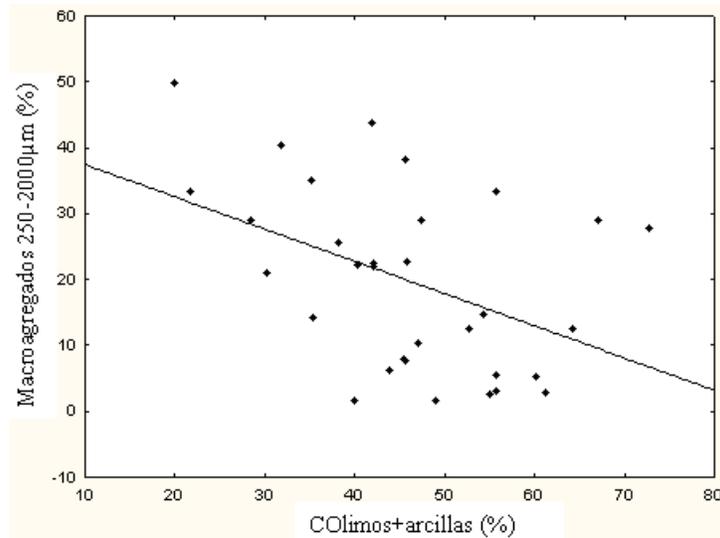


b

Gráfica 14. Correlación entre los microagregados y (a): CO arenas y (b): COT en el horizonte A del sitio 1

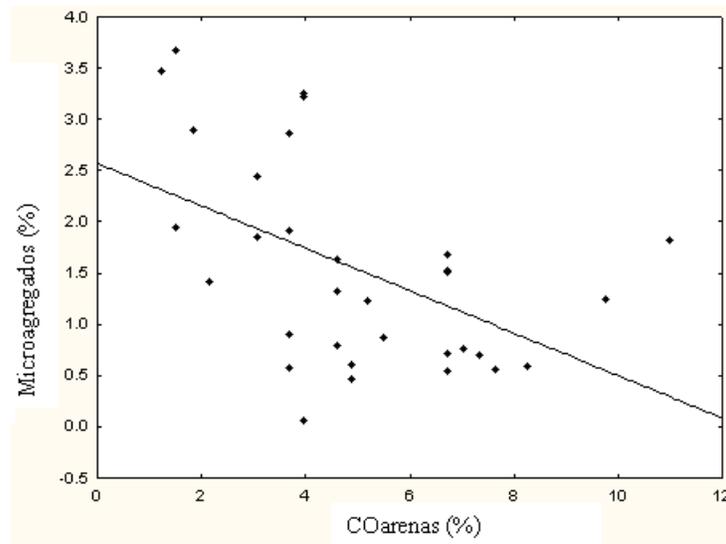
En el sitio 2, correspondiente al Phaeozem, no se encontraron relaciones significativas entre los macroagregados (>2000 μ m) y ninguna de las variables estudiadas (Tabla 3). En lo que corresponde a los mesoagregados, la correlación más significativa que se encontró fue con el carbono orgánico asociado a la fracción correspondiente a limos + arcillas (CO limos+arcillas). Dicha correlación tomó valor de -0.445 (Tabla 3) y es considerada como moderada negativa. La

gráfica 15 muestra que, al aumentar la concentración del carbono orgánico en tal fracción granulométrica, el porcentaje de mesoagregados estables en agua disminuye.

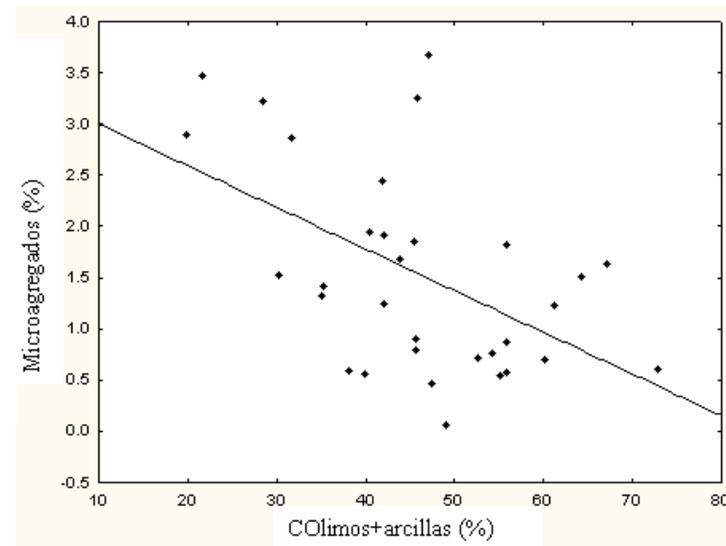


Gráfica 15. Correlación entre los mesoagregados y el CO en limos+arcillas en el horizonte A del sitio 2

Para el porcentaje de microagregados estables en agua del horizonte A en el sitio 2, las correlaciones significativas se encontraron con el contenido de CO en arenas, así como con el CO asociado a limos + arcillas (Tabla 3). La gráfica 16 muestra las relaciones lineales existentes entre ese tamaño de agregados y las variables mencionadas anteriormente. El coeficiente de correlación entre el porcentaje de agregados y el CO de arenas corresponde a -0.495 , mientras que para el porcentaje del mismo tamaño de agregados y CO limos+arcillas es de -0.5130 . En ambos casos, los porcentajes de agregados estables disminuyen al aumentar las concentraciones de carbono orgánico asociado a ambas fracciones granulométricas.



a



b

Gráfica 16. Correlación entre los microagregados y (a): el CO en arenas y (b): el CO en limos+arcillas en el horizonte A del sitio 2

CAPÍTULO VI

DISCUSIÓN

1. Mantillo forestal

Antes que nada, es conveniente mencionar que la nomenclatura para este trabajo, en relación a los horizontes encontrados en el mantillo forestal se basa en definiciones presentes en trabajos tradicionales (Pritchett, 1986), pero que aún siguen vigentes (Broll et al., 2006). Así mismo, me parece conveniente resaltar el hecho de que se realizó una sola colecta de mantillo a finales de la época de secas (finales del mes de mayo).

En campo se reconocieron, para ambos sitios de estudio, los horizontes de acumulación (O_l) y de fermentación (O_f), y el límite entre ellos fue abrupto. Como se indica en los cuadros 5.1 y 5.2 (pp 41 y 42), y según Pritchett (1986), el mantillo forestal se considera poco espeso, característica que coincide con lo observado en diversos estudios de dinámica de descomposición de litter en suelos forestales de ambientes tropicales (Tapia-Coral et al., 2005; Veneklaas, 1991; Brown y Lugo, 1982). Tal característica del mantillo puede ser atribuida a que, en condiciones tropicales, la dinámica de descomposición de la materia orgánica se ve favorecida debido a la relación temperatura/precipitación que se presenta en tales ambientes, característica que aumenta la actividad de los organismos encargados de llevar a cabo la descomposición de la materia orgánica (Weaver et al., 1987; Brown y Lugo, 1982).

El bosque desarrollado sobre el Alisol Úmbrico (sitio 1) es el que presentó una mayor cantidad de mantillo forestal al momento del muestreo, en comparación con el del Phaeozem Lúvico (sitio 2) (Gráfica 1). Esta menor proporción de mantillo forestal se presenta en el sitio reportado por Kurzmeier y Wiedenmann (2006) como el más diverso de los dos. Lo anterior se explica en relación a observaciones realizadas en trabajos previos (Hättenschwiler, 2005; Zimmer, 2002), en los cuales

se determinó que una mayor diversidad en la composición vegetal del mantillo forestal está relacionada también a una mayor diversidad y actividad de los organismos edáficos encargados de llevar a cabo la descomposición y transformación de la materia orgánica, por lo que su masa será menor que la que se pueda presentar en sitios menos diversos. Por otro lado, la composición de las hojas y elementos presentes en el mantillo forestal va a determinar diferentes velocidades de descomposición, al hacer mas o menos accesible el recurso para los microorganismos (Osuna y Pérez-Amador, 2003).

En lo que se refiere a la reacción del mantillo, expresada en términos de pH, aunque los valores de ambos horizontes O pueden ser considerados como neutros (Porta et al., 1999), al presentarse valores promedio de pH en agua muy cercanos a siete (Gráfica 3); el mantillo del sitio 1 puede ser considerado como ligeramente más ácido que el del sitio 2. En tanto que la acidez/basicidad de una determinada solución está determinada por los cationes presentes (Porta et al., 1999), se encuentra una correspondencia entre los mayores valores de pH en el Phaeozem, con los mayores contenidos de sodio y potasio presentes en el mantillo sobre este grupo de suelo.

El horizonte Oi de ambos sitios tuvo un porcentaje de pérdida por ignición bastante alto (alrededor del 80%) (Gráfica 4), lo cual indica que lo que se sometió a ignición en este horizonte corresponde a restos de materiales vegetales, como hojas, pequeños pedazos de ramas, frutos y restos de algunos animales, ya que esta técnica asegura la completa pérdida de los materiales orgánicos que componen los tejidos animales y vegetales (Christensen y Malmros, 1982); y el restante 20% (porcentaje aproximado), corresponde únicamente a las sales constituyentes de tales restos orgánicos.

El horizonte Of los porcentajes promedio de pérdida por ignición en el sitio 1 y 2 son de 54 y 60%, respectivamente. Una posible explicación a estos resultados es que este horizonte, además de contener restos orgánicos, se encuentra ya

mezclado con el horizonte mineral sobre el que se establece (Burghouts et al., 1998) y dado que en el sitio de estudio se reporta como material parental granitos y gneiss (Kurzmeier y Widenmann, 2006), que están constituidos principalmente por silicatos, aunado a una alta proporción de limos + arcillas, lo cual contribuye al alto porcentaje de cenizas en forma de alúmino-silicatos y óxidos de Fe y Al. Lo anterior, se ve reforzado con observaciones en relación al color de las cenizas resultantes al llevar a cabo esta técnica. Las cenizas correspondientes al horizonte de fermentación fueron de una coloración rojiza (Figura 6.1a), lo cual indica, de forma indirecta, contenidos de los elementos mencionados anteriormente.



(a)



(b)

Figura 6.1. Coloración de las cenizas del horizonte Of (a) y Oi (b)

Respecto a los contenidos de sodio y potasio en ambos horizontes orgánicos, tanto en su forma soluble como en la total, se observa una disminución en la concentración de ambos elementos al aumentar la profundidad del perfil (Gráficas 6 y 7). Lo anterior es más evidente en relación al contenido de potasio total, en el que se observa una drástica disminución de su concentración en el horizonte más profundo, resultados que se contraponen en lo observado en otros bosques tropicales, en los cuales la concentración de este elemento aumenta proporcionalmente a la profundidad, debido a que el potasio ha sido reconocido como el elemento que se lava más rápidamente de la materia orgánica tanto viva

como muerta, con respecto al sodio y otros elementos¹ (Tapia-Coral et al., 2005; Burghouts et al., 1998; Laskowski et al., 1995; Veneklaas, 1991; Anderson et al., 1983;). Una explicación a esta diferencia de resultados, es que la única colecta del mantillo forestal se realizó al final de la época de secas (en el mes de mayo), lo cual implica que este y otros elementos solo estuvieron acumulándose en las hojas y demás componentes del mantillo, al no haber presencia del agua necesaria para su lavado del horizonte Oi y posterior paso al Of.

La existencia de horizontes Oi con bajo porcentaje de transformación y Of con restos poco reconocibles; ambos horizontes de poco espesor y con límites abruptos, así como los valores de pH obtenidos, que son cercanos a la neutralidad, permiten clasificar el tipo de mantillo forestal como mull (Broll et al., 2006; Pritchett, 1986; Duchaufour, 1978;).

El humus tipo mull se caracteriza por tener condiciones (principalmente de pH) favorables a la actividad biológica, por lo que el mantillo forestal será rápidamente colonizado por la microflora edáfica y por lo tanto la hojarasca desaparecerá muy rápido (Duchaufour, 1978). Por ello, la barrera entre el horizonte O y el A es muy repentina (Gobat et al., 2003).

¹ Velocidad de pérdida de elementos del mantillo forestal: K>Mg>Ca>S>Cu>Na>Mn=Cd>Pb=Zn>Fe (Laskowski et al., 1995).

2. Suelo

El sitio 1 presenta, en el horizonte superficial, un valor promedio de pH en agua (también conocido como pH activo) de 5.2, el cual puede ser clasificado como fuertemente ácido; mientras que el sitio 2 presentó un valor promedio de pH activo de 6.05, y es considerado medianamente ácido y adecuado para el crecimiento de la mayoría de los cultivos (Porta et al., 1999). Los valores mayores de pH encontrados en el Phaeozem corresponden con altos contenidos de carbono orgánico presentes en este sitio, comparado con el Alisol.

Los valores de carbono orgánico total para ambos sitios disminuyen al pasar de un horizonte a otro, lo cual está relacionado con un aumento de la densidad aparente en el segundo horizonte mineral con respecto al primero.

Al llevar a cabo la separación de fracciones granulométricas dispersables en agua, se esperaba obtener una mayor proporción de arcillas en ambos sitios, correspondiente con los datos obtenidos en un trabajo previo, en el que éste tamaño de partícula domina sobre limos y arenas (Kurzmeier y Wiedenmann, 2006). Sin embargo, en el presente estudio se obtuvo el siguiente orden de tamaño dominante de partícula: limos>arenas>arcillas, dominancia que es válida para ambos sitios. Lo anterior se explica en relación a que, muy seguramente, al llevar a cabo la prueba de separación de fracciones granulométricas, la dispersión de limos y arcillas fue incompleta, debido a que no se utilizó ningún agente dispersante ni se oxidó la materia orgánica. La dispersión de agregados así como la oxidación de la materia orgánica son condiciones necesarias para lograr una completa dispersión de partículas, ya que la mayoría de las veces los agregados son resistentes a fuerzas mecánicas disruptivas, como la agitación (Golchin et al, 1997), que consistió en el único medio empleado para tratar de disgregar los agregados del suelo. La causa de no haber empleado agentes dispersantes radica en que uno de los objetivos de este estudio consistió precisamente en conocer la cantidad de carbono orgánico asociado a cada tamaño de partícula. Entonces, las

arcillas quedaron unidas entre sí, formando microagregados del tamaño de limos y por ello, fueron consideradas dentro de ese tamaño de partícula (Plante et al., 2006). Tal aseveración se ve reforzada tomando en cuenta los altos contenidos de carbono orgánico presentes en la fracción correspondiente a limos, lo cual permite reforzar la inferencia de que las partículas de arcilla quedaron unidas por materia orgánica formando agregados del tamaño de limos. Debido a ello, y para los fines de este estudio, los valores de limos y arcillas, tanto de contenido (en porcentaje) como de contenido de carbono orgánico se sumaron y tomaron como un solo dato (fracción limos + arcillas), resultando en la fracción dominante.

En ambos sitios, los macroagregados ($>2000 \mu\text{m}$) representaron el mayor porcentaje de agregados estables en agua. Este porcentaje es mayor en el horizonte superficial y disminuye en el subsuperficial. En el caso de los mesoagregados (tamaño comprendido entre 250 a $2000 \mu\text{m}$) y microagregados ($<250 \mu\text{m}$), sucede lo contrario; es decir, el horizonte superficial presenta un menor porcentaje de estos tamaños y aumenta proporcionalmente a la dirección del perfil. Lo anterior, se relaciona con un aumento en los contenidos de arcillas en el horizonte A_1 con respecto al A_2 , lo cual está en concordancia con observaciones realizadas en trabajos previos, en los cuales se ha observado que la formación de macroagregados está relacionada con los contenidos de la materia orgánica, mientras que en los niveles de agregación menores están involucrados agentes inorgánicos, como los contenidos y características de arcillas e (hidr)óxidos de hierro y aluminio (Deneff y Six, 2005; Six et al., 2000b; Golchin et al., 1997).

En uno y otro sitio, los contenidos de arcillas aumentan de manera proporcional a la profundidad del perfil; es decir, el horizonte sub-superficial presenta mayores contenidos de arcillas que el superficial. Sucede lo mismo con el tamaño de microagregados y macroagregados de 250 a $2000 \mu\text{m}$, lo cual indica, de manera indirecta, que las arcillas desempeñan un papel importante en la formación de esos tamaños de agregados.

3. Análisis de correlación

En relación al horizonte A del sitio 1, se encontraron correlaciones positivas moderadas entre el carbono orgánico asociado a la fracción arenosa y el porcentaje de macroagregados estables, así como entre los mesoagregados y el carbono orgánico total. Lo anterior está en concordancia con observaciones realizadas en que el carbono orgánico es el principal agente cementante en niveles de agregación mayores (Onweremadu et al., 2007; Weil y Magdoff, 2004; Jastrow y Miller, 1997). Por otro lado, y en lo que respecta a los microagregados, las correlaciones encontradas son moderadas negativas y corresponden al carbono orgánico asociado a las arenas y el carbono orgánico total, lo cual indica que en la formación y estabilización de este tamaño de agregados el papel de la materia orgánica del suelo no es de trascendental importancia. Entonces, para el caso de los microagregados, dado que no se encontró una correlación positiva significativa con los contenidos de limos+arcillas, se puede pensar que los agentes involucrados en su formación y estabilización corresponden a sesquióxidos de hierro y aluminio así como a las características de las arcillas contenidas en este suelo (Barthès et al., 2008; Lützow et al., 2006).

En lo que respecta al sitio 2, no se encontraron niveles de correlación significativos entre los macroagregados y ninguna de las variables estudiadas. Ello puede atribuirse al papel desempeñado por restos animales y/o vegetales de reciente incorporación, así como de las raíces e hifas, en la formación de macroagregados (Lützow et al., 2006). Tales elementos han sido reconocidos como agentes de unión temporales muy importantes (Six et al., 2000a; Jastrow y Miller, 1997) y no fueron tomados en consideración al realizar los análisis de carbono orgánico (es decir, el suelo se tamizó y fueron eliminados restos orgánicos mayores a 2 mm, que es el tamaño que corresponde a esta categoría de materia orgánica (Christensen, 2001)). Por ello, se considera que en este sitio, los agentes de unión temporales son importantes en la formación y estabilización de macroagregados. Por otro lado y al igual que lo observado en el sitio 1, los meso y microagregados

mostraron correlaciones moderadas negativas con los contenidos de carbono orgánico asociado tanto a la fracción arenosa como a la de limos+arcillas. Ello se puede atribuir, de igual forma, al papel desempeñado por las atracciones electrostáticas generadas entre las partículas de arcillas y óxidos de hierro y aluminio (Six et al., 2000b).

A pesar de presentar altos contenidos de carbono orgánico presentes en ambos grupos de suelos, éstos no tienen valores de correlación significantes con la formación y estabilización de agregados. Estos resultados coinciden con lo observado por Six et al. (2002), y van der Waat y Valentin (1992). Ambos estudios encontraron, para suelos de textura fina, altos contenidos de carbono orgánico, que sin embargo, no están relacionados con el proceso de formación y estabilización de agregados. Los últimos autores, además, concluyeron que el carbono orgánico es un agente de formación de agregados más importante en suelos arenosos que en suelos de texturas finas

CONCLUSIONES

- ⇒ El tipo de humus presente en ambos sitios de estudio es mull, lo cual indica una alta actividad biológica.
- ⇒ Se encontró que las estructuras dominantes son granulares.
- ⇒ Los macroagregados representaron el tamaño de agregados más estable, seguido de meso y microagregados.
- ⇒ En el sitio 1 se encontraron correlaciones positivas entre los macroagregados y el carbono orgánico asociado a las arenas, así como entre los mesoagregados y el COT. Para los microagregados no se encontraron correlaciones significativas, lo cual indica que en este nivel de agregación están involucrados agentes diferentes a los estudiados aquí (sesquióxidos de Fe y Al y mineralogía).
- ⇒ En el sitio 2 no se encontró correlación alguna entre el porcentaje de macroagregados estables y ninguna de las variables, lo cual puede atribuirse a que la formación de este tamaño de agregados puede estar a cargo de materia orgánica de reciente incorporación en primeras fases de descomposición (principalmente raíces). La formación de macro y meso agregados puede estar a cargo de sesquióxidos de Fe y Al.
- ⇒ El tipo de humus encontrado indica que la actividad biológica es alta, implicando procesos rápidos de transformación de la materia orgánica. Así mismo, la presencia de macroagregados estables en el suelo favorece el establecimiento y desarrollo de la vegetación. Por ello, puede concluirse que ambos sitios presentan alta calidad.

LITERATURA CITADA

- ⇒ Anderson JM, Proctor J y Vallack HW. 1983. Ecological studies in four contrasting lowland rain forests in Gunung Mulu National Park, Sarawak. II. Decomposition processes and nutrient losses from leaf litter. *Journal of Ecology* 7:503-527.
- ⇒ Angers DA y Mehuys GR. 1993. Aggregate stability to water. En: Carter MR (ed). *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Lewis Publishers. EUA, pp 651-655.
- ⇒ Angers D y Chenu C. 1999. Dynamics of soil carbon sequestration. En: Lal R, Kimble JM, Follet RF y Stewart BA. *Soil Processes and the Carbon Cycle*. CRC Press. EUA, pp. 199-206.
- ⇒ Attiwill PM. 1968. The loss of elements from decomposing litter. *Ecological Society of America* 49:142-145.
- ⇒ Barajas-Guzmán G. y Álvarez-Sánchez J. 2003. La comunidad de desintegradores en una selva húmeda tropical. En: Álvarez-Sánchez J. y Naranjo-García E (eds). *Ecología del Suelo en la Selva Tropical Húmeda de México*. Instituto de Ecología, A.C., Instituto de Biología y Facultad de Ciencias UNAM. México, 162-184p.
- ⇒ Barthès BG, Kouakoua E, Larré-Larrouy MC, Razafimbela TM, de Luca EF, Azontande PL y Feller CL. 2008. Texture and sesquioxide effects on water-stable aggregates and organic matter in some tropical soils. *Geoderma* 143: 14-25.
- ⇒ Baver LD. 1952. *Soil Physics*. John Wiley & Sons, Inc. New York Chapman & Hall. Limited. Londres, 398p.
- ⇒ Berg B y Laskowski R. 2006. *Litter decomposition: a guide to carbon and nutrient turnover*. Academic Press. EUA. 419p.

- ⇒ Blackman A, Albers HJ, Ávalos-Sartorio B, Crooks L. 2007. Land cover in a managed forest ecosystem. Mexican Shade Coffee (discussion paper). Resources for the Future. EUA, 33p.
- ⇒ Blake GR y Hartage KH. 1990. Bulk density. En: Klute A (ed). Methods of Soil Analysis. Parte 1. ASA, SSSA. EUA, pp 363-382.
- ⇒ Brasell HM, Unwin GL y Stopker GC. 1980. The quantity, temporal distribution and mineral-element content of litterfall in two forest types and two sites in Tropical Australia. *The Journal of Ecology* 68:123-139.
- ⇒ Broll G, Brauckmann HJ, Overesch M, Junge B, Erber C, Milbert G, Baize D y Nachtergaele F. 2006. Topsoil characterization-recommendations for revision and expansion of the FAO-Draft (1998) with emphasis on humus forms and biological features. *J. Plant Nutr. Soil Science* 169:453-461.
- ⇒ Brown S, Lugo AE. 1982. The storage and production of organic matter in tropical forests and their role in the global carbon cycle. *Biotropica* 14:161-187.
- ⇒ Burghouts TBA, van Straalen NM y Bruijnzeel LA. 1998. Spatial heterogeneity of element and litter turnover in a bornean rain forest. *Journal of Tropical Ecology* 14:477-505.
- ⇒ Centeno-García E. 2004. Configuración geológica del estado. En: García-Mendoza AJ, Ordóñez MJ y Briones-Salas M. (eds). Biodiversidad de Oaxaca. Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México-Fondo Oaxaqueño para la conservación de la naturaleza-World Wildlife Fund, México, pp. 29-42.
- ⇒ Christensen BT y Malmros PA. 1982. Loss-on-ignition and carbon content in a beech forest soil profile. *Holarctic Ecology* 5:376-380.

- ⇒ Christensen BT. 2001. Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover. *Journal of Soil Science*. 52:345-353.
- ⇒ Cuevas E y Lugo AE. 1998. Dynamics of organic matter and nutrient return from litterfall in stands of ten tropical tree plantation species. *Forest Ecology and Management* 112:263-279.
- ⇒ Deneff K, Six J, Paustian K y Merckx R. 2001. Importance of macroaggregate dynamics in controlling soil carbon stabilization: short-term effects of physical disturbance induced by dry-wet cycles. *Soil Biology & Biochemistry* 33:2145-2153.
- ⇒ Deneff K y Six J. 2005. Clay mineralogy determines the importance of biological versus abiotic processes for macroaggregate formation and stabilization. *European Journal of Soil Science* 56:469-479.
- ⇒ Descheemaeker K, Mays B, Nyssen J, Poesen J, Raes D, Haile M y Deckers J. 2006. Litter production and organic matter accumulation in exclosures of the Tigray highlands, Ethiopia. *Forest Ecology and Management* 223:21-35.
- ⇒ Dixon JB y White GN. 1999. Soil mineralogy. Laboratory manual. Agronomy 626. Soil and Soil Sciences Department, Texas A&M University, College Station. EUA, 164p.
- ⇒ Duchaufour P. 1978. Manual de Edafología. Toray-Masson, S.A. España, 467p.
- ⇒ FAO. 2006. World reference bases for soil resources. 2a edición. *World Soil Resources Reports No. 103*. FAO, Roma. 128p.
- ⇒ Feller C y Beare MH. 1997. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. *Geoderma* 79:69-116.
- ⇒ García-Calderón NE, Ibáñez-Huerta A., Álvarez-Arteaga G, Krasilnikov PV y Hernández-Jiménez A. 2006. Soil diversity and properties in mountainous

subtropical areas, in Sierra Sur de Oaxaca, Mexico. *Canadian Journal of Soil Science* 86:61-76.

⇒ García E, 1978. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. UNAM. México. 246p.

⇒ Gobat J-M, Arango M, Matthey W. 2003. *The Living Soil. Fundamentals of soil science and soil Biology*. Science Publishers, Inc. EUA, 602p.

⇒ Golchin A, Baldock JA y Oades JM. 1997. A model linking organic matter decomposition, chemistry and aggregate dynamics. En: Lal R, Kimble JM, Follet RF y Stewart BA. *Soil Processes and the Carbon Cycle*. CRC Press. EUA, pp 245-265.

⇒ Hättenschwiler S. 2005. Effects of tree species diversity on litter quality and decomposition. En: Scherer-Lorenzen M, Körner Ch. y Schulze E-D (eds). *Forest Diversity and Function. Temperate and Boreal Systems*. Springer-Verlag. Alemania, pp 149-164.

⇒ Heal OW, Anderson JM y Swift MJ. 1997. Plant litter quality and decomposition: An historical overview. En: Cadisch G y Giller KE (eds). *Driven by Nature: Plant Litter Quality and Decomposition*. CAB International. Reino Unido, pp 3-29

⇒ Hevia GG, Buschiazzi DE, Hepper EN, Urioste AM y Antón EL. 2003. Organic matter in size fractions of soils of the semiarid Argentina. Effects of climate, soil texture and management. *Geoderma*. 116:265-277.

⇒ Hillel D. 1998. *Soil physics*. Academic Press. EUA, 771p.

⇒ INEGI. 1998. Carta edafológica 1:250,000. Puerto Escondido. Clave D14-3.

⇒ INEGI. 1998. Carta geológica 1:250,000. Puerto Escondido. Clave D14-3.

- ⇒ INEGI. 2000. Carta topográfica 1:50,000. Santa María Huatulco. 2ª edición. Clave D14B19.
- ⇒ INEGI. 2005. Síntesis de Información Geográfica del Estado de Oaxaca. 662p.
- ⇒ Jackson ML. 1982. Análisis químico de suelos. Ediciones Omega. España, 662p.
- ⇒ Jastrow JD y Miller RM. 1997. Soil aggregate stabilization and carbon sequestration: feedbacks through organomineral associations. En: Lal R, Kimble JM, Follet RF y Stewart BA (eds). Soil Processes and the Carbon Cycle. CRC Press. EUA, pp 201-223.
- ⇒ Kay BD. 1997. Soil structure and organic carbon: a review. En: Lal R, Kimble JM, Follet RF y Stewart BA (eds). Soil Processes and the Carbon Cycle. CRC Press. EUA, pp 169-197.
- ⇒ Kemper WD y Rosenau RC. 1986. Aggregate stability and size distribution. En: Klute A (ed). Methods of Soil Analysis. Parte 1. Physical and Mineralogical Methods. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America. EUA, pp 425-442.
- ⇒ Krasilnikov PV, García-Calderón NE, Sedov SN, Vallejo-Gómez C y Ramos-Bello R. 2005. The relationship between pedogenic and geomorphic processes in mountainous tropical forested areas in Sierra Madre del Sur, Mexico. *Catena* 62:14-44.
- ⇒ Kurzmeier S y Wiedenmann T. 2006. Soil properties, associated tree diversity and stand structure of two second-growth forest sites in the Sierra Madre del Sur, Oaxaca, Mexico. Tesis Technische Universitat Munchen. Alemania, 156p.
- ⇒ Laskowski R, R, Niklinska M, Maryanski. 1995. The dynamics of chemical elements in forest litter. *Ecology* 76:1393-1406.

⇒ Lutzow MV, Kögel-Knabner I, Ekschnitt K, Matzner E, Guggenberg G, Marschner B, Flessa H. 2006. Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions-a review. *European Journal of Soil Science* 57:426-445.

⇒ Matus JF y Maire RC. 2000. Relación entre la materia orgánica del suelo, textura del suelo y tasas de mineralización de carbono y nitrógeno. *Agricultura Técnica* 60:112-126.

⇒ Moguel P y Toledo VM. 1999. Biodiversity conservation in traditional coffee systems of Mexico. *Conservation Biology* 13: 11-21.

⇒ Nair PKR, Buresh RJ, Mugendi DN y Latt CR. 1999. Nutrient cycling in tropical agroforestry systems: myths and science. En: Buck LE, Lassoie JP y Fernandes ECM (eds). *Agroforestry in Sustainable Agricultural Systems*. CRC Press. EUA, pp 1-31.

⇒ Nelson DW, Sommers LE. 1982. Total carbon, organic carbon and organic matter. En: *Methods of soil analysis. Parte 2*. Eds: Page AL, Millar RH, Keenei DR. American Society of Agronomy. Soil Science Society of America. EUA, pp 539-579.

⇒ Onweremadu EU, Onya UN y Anikwe MAN. 2007. Carbon and nitrogen distribution in water-stable aggregates under two tillage techniques in Fluvisols of Owerri area, south-eastern Nigeria. *Soil and Tillage Research* 97: 195-206.

⇒ Ortiz PMA, Hernández SJR y Figueroa ME. 2004. Reconocimiento fisiográfico y geomorfológico. En: García-Mendoza AJ, Ordóñez MJ y Briones-Salas M. (eds). *Biodiversidad de Oaxaca*. Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México-Fondo Oaxaqueño para la conservación de la naturaleza-World Wildlife Fund, México, pp. 43-54.

⇒ Osuna M y Pérez-Amador C. 2003. Metabolitos primarios y secundarios en la descomposición. En: Álvarez-Sánchez J. y Naranjo-García E (eds). Ecología del Suelo en la Selva Tropical Húmeda de México. Instituto de Ecología, A.C., Instituto de Biología y Facultad de Ciencias UNAM. México, 122-139p.

⇒ Plante AF, Conant RT, Stewart CE, Paustian K y Six J. 2006. Importance of soil texture on the distribution of soil organic matter in physical and chemical fractions. *Soil Science Society of American Journal*. 70:287-296.

⇒ Plaster E. 2000. La ciencia del suelo y su manejo. Editorial Paraninfo. España, 419p.

⇒ Ponge J-F. 2003. Humus forms in terrestrial ecosystems: a framework to biodiversity. *Soil Biology & Biochemistry*. 35: 935-945.

⇒ Porta CJ, López-Acevedo RM, Roquero dLC. 1999. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. 2ª edición. España. 849p.

⇒ Pritchett WL. 1986. Suelos forestales. Propiedades, conservación y mejoramiento. Limusa. México, 634p.

⇒ Rzedowsky J. 1978. Vegetación de México. Limusa. México. 432 p.

⇒ Scharpenseel HW. 1997. Preface to workshop "Management of carbon in tropical soils under global change: Science, practice and policy". *Geoderma* 79:1-8

⇒ Siebe C, Jahn R, Stahr K. 1996. Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo. Publicación especial 4. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo AC. Chapingo, México.

⇒ Siebe C, Jahn R, Stahr K. 2006. Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo. 2ª edición. Publicación especial 4. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo AC. Chapingo, México.

- ⇒ Six J, Elliot ET, Paustian K y Doran JW. 1998. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils. *Soil Science Society of America Journal*. 62:1367-1377.
- ⇒ Six J, Elliot ET y Paustian K. 2000a. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no tillage agriculture. *Soil Biology & Biochemistry* 32:2099-2103.
- ⇒ Six J, Paustian K, Elliot ET y Combrink C. 2000b. Soil structure and organic matter: I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon. *Soil Science Society of America Journal*. 64:681-689.
- ⇒ Six J, Elliot ET y Paustian K. 2000c. Soil structure and soil organic matter: II. A normalized stability index and the effect of mineralogy. *Soil Science of America Journal*. 64:1042-1049.
- ⇒ Six J, Feller C, Deneff K, Ogle SM, Morales SA de JC, Albrecht A. 2002. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils-effects of no-tillage. *Agronomie* 22:755-775.
- ⇒ Tapia-Coral SC, Luizao FJ, Wandelli E y Fernandes ECM, 2005. Carbon and nutrient stocks in the litter layer of agroforestry systems in central Amazonia, Brazil. *Agroforestry Systems* 65:33-42.
- ⇒ Torres-Colin R. 2004. Tipos de vegetación. En: García-Mendoza AJ, Ordóñez MJ y Briones-Salas M. (eds). *Biodiversidad de Oaxaca*. Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México-Fondo Oaxaqueño para la conservación de la naturaleza-World Wildlife Fund, México, pp. 105-117.
- ⇒ Trejo I. 2004. Clima En: García-Mendoza AJ, Ordóñez MJ y Briones-Salas M. (eds). *Biodiversidad de Oaxaca*. Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México-Fondo Oaxaqueño para la conservación de la naturaleza-World Wildlife Fund, México, pp. 67-85.

- ⇒ Van der Watt HH, Valentin C. 1992. Soil crusting: the African view. En: Sumer ME y Stewart BA. Soil Crusting: Chemical and Physical Processes. Lewis Publishers. EUA, pp 301-329.
- ⇒ van Reeuwijk LP. 2002. Procedures for soil analysis. 6ª ed. International Soil Reference Information Centre-Food and Agriculture Organization of United Nations.
- ⇒ Veneklaas EJ. 1991. Litterfall and nutrient fluxes in two montane tropical rain forests, Colombia. *Journal of Tropical Ecology* 7:319-336.
- ⇒ Vergara M., Etchevers J. 2004. Indicadores de la calidad del suelo en laderas de la Sierra Norte. En: García-Mendoza AJ, Ordóñez MJ y Briones-Salas M. (eds). Biodiversidad de Oaxaca. Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México-Fondo Oaxaqueño para la conservación de la naturaleza-World Wildlife Fund, México, pp. 585-602
- ⇒ Weaver PL, Birdsey RA y Lugo AE. 1987. Soil organic matter in secondary forests of Puerto Rico. *Biotropica* 19:17-23.
- ⇒ Weil RR y Magdoff F. 2004. Significance of soil organic matter to soil quality and health. En: Weil RR, Magdoff F (eds). *Soil Organic Matter in Sustainable Agriculture*. CRC Press. EUA, pp. 1-43.
- ⇒ Wilde SA, Corey RB, Lyer JG y Voigt GK, 1979. Soil and plant analysis for tree culture. Oxford & IBH. India.
- ⇒ Zimmer M. 2002. Is decomposition of woodland leaf litter influenced by its species richness? *Soil Biology & Biochemistry*. 34:277-284.

ANEXO 1. Descripción morfológica de los perfiles de suelo, Siebe et al. (1996).

Sitio	Muestra	Horizonte	Profundidad (cm)	Color	Estructura	pH	Humedad (%)
I	1	A1	0-5/12	7.5 YR 3/2 Pardo oscuro	Granular fina, débil desarrollo	7	60
		A2	5/12-21	7.5 YR 3/2 Pardo oscuro	Granular fina, mediana, débil desarrollo; BSA pequeños, débil desarrollo	7	55
I	2	A1	0-8/9	10 YR3/2 Pardo gris muy oscuro	Granular fina, mediana y grande, débil desarrollo	7	60
		A2	8/9-15	10YR3/2 Pardo gris muy oscuro	Granular fina, débil desarrollo; BSA pequeños, débil desarrollo y medianos con moderado	7	75
I	3	A1	0-7	10 YR 4/3 Pardo oscuro	Granular fina y BSA pequeños, ambos con débil desarrollo	7	70
		A2	7-20	10YR3/2 Pardo gris muy oscuro	BSA medianos, moderado desarrollo	7	80
I	4	A1	0-14	10YR4/2 Pardo gris oscuro	Granular fina y mediana, desarrollo débil y moderado, respectivamente. BSA pequeños	7	55
		A2	14-26	10YR4/2 Pardo gris oscuro	Granular fina, débil desarrollo; BSA con débil desarrollo	7	55
I	5	A1	0-11	10YR2/2 Pardo muy oscuro	BSA pequeños con débil desarrollo	7	70
		A2	11-21	10YR2/2 Pardo muy oscuro	Granular mediana y fina BSA , todos con débil desarrollo	7	60
I	6	A1	0-10	10 YR3/2 Pardo gris muy oscuro	BSA medianos y pequeños, ambos con débil desarrollo	7	52
		A2	10-20	10 YR 3/3 Pardo oscuro	Granular fina y BSA pequeños y medianos, con débil desarrollo	7	60
I	7	A1	0-10	10 YR 3/3 Pardo oscuro	Granular fina, moderado desarrollo; BSA pequeños con débil desarrollo	7	65
		A2	10-23	10 YR 3/3 Pardo oscuro	BSA medianos, débil desarrollo	7	65
I	8	A1	0-11	7.5 YR 3/2 Pardo oscuro	Granular fina y BSA medianos, ambos con débil desarrollo	7	60
		A2	11-28	7.5 YR 3/2 Pardo oscuro	Granular fina, débil desarrollo y BSA pequeños y medianos con débil desarrollo	7	70
I	9	A1	0-10	7.5 YR 3/2 Pardo oscuro	Granular pequeña y mediana con débil desarrollo; BSA pequeños con débil desarrollo y medianos con desarrollo moderado	7	61

Anexo 1, continuación

		A2	10-20	7.5 YR 3/2 Pardo oscuro	BSA pequeños con débil desarrollo y medianos con moderado desarrollo	7	70
II	10	A1	0-11	7.5 YR 3/2 Pardo oscuro	Granular fina y mediana con moderado desarrollo; BSA pequeños con débil desarrollo	7	70
II	11	A1	0-12	10YR3/2 Pardo gris muy oscuro	Granular pequeña con desarrollo moderado; BSA medianos con moderado desarrollo	7	65
		A2	12-26	10YR3/2 Pardo gris muy oscuro	Granular mediana y pequeña; BSA medianos, todos con moderado desarrollo	7	59
II	12	A1	0-5	10 YR 3/3 Pardo oscuro	Granular fina y BSA con moderado desarrollo	7	69
		A2	5-18	10YR3/2 Pardo gris muy oscuro	BSA grandes con moderado desarrollo	7	62
II	13	A1	0-10	10YR4/2 Pardo gris oscuro	Granular fina, mediana y BSA medianos, todos con débil desarrollo	7	60
		A2	10-23	10YR3/2 Pardo gris muy oscuro	Granular fina y BSA medianos, ambos con débil desarrollo	7	65
II	14	A1	0-15	10YR3/2 Pardo gris muy oscuro	Granular pequeña y mediana, BSA pequeños, todos con moderado desarrollo	7	45
II	15	A1	0-5	10YR4/2 Pardo gris oscuro	Granular mediana con moderado desarrollo	7	30
		A2	5-14	10YR3/2 Pardo gris muy oscuro	BSA medianos con moderado desarrollo	7	48
II	16	A1	0-11	10YR4/2 Pardo gris oscuro	Granular fina con moderado desarrollo	7	50
		A2	11-20	10YR4/2 Pardo gris oscuro	Granular fina con moderado desarrollo; BSA medianos con moderado desarrollo	7	60
II	17	A1	0-8	10YR4/2 Pardo gris oscuro	Granular pequeña y mediana; BSA pequeños, todos con moderado desarrollo	7	30
		A2	8-22	10YR3/2 Pardo gris muy oscuro	Granular pequeña con moderado desarrollo; BSA medianos y pequeños con débil desarrollo	7	40
II	18	A1	0-8	10YR4/2 Pardo gris oscuro	Granular pequeña y mediana; BSA pequeños, todos con moderado desarrollo	7	30
		A2	8-19	10YR3/2 Pardo gris muy oscuro	Granular mediana y pequeña; BSA pequeños, todos con moderado desarrollo	7	55

Sitio I: Sitio correspondiente al Alisol; Sitio II: Sitio correspondiente al Phaeozem.

BSA: Bloques subangulares

Anexo 2. Estadística descriptiva de los análisis de mantillo forestal

Hz O		pH H ₂ O	pH KCl	Cenizas (%)	Pérdida por ignición (%)	K soluble	K total	Na soluble	Na total
		(cmol ₍₊₎ kg ⁻¹)							
ALISOL									
Promedio	L	6.97	6.17	17.83	82.17	2.46	8.05	0.74	1.03
	F	6.78	5.8	45.64	54.35	0.70	2.23	0.35	0.98
Máximo	L	7.45	6.60	28.98	89.54	3.65	16.6	0.87	1.53
	F	7.25	6.20	63.52	76.85	1.09	4.34	0.52	1.53
Mínimo	L	6.50	5.70	10.46	70.70	1.51	3.29	0.51	0.24
	F	6.45	5.65	23.15	36.48	0.46	1.24	0.23	0.61
Desviación estándar	L	0.307	0.321	7.04	7.04	0.73	3.89	0.12	0.38
	F	0.219	0.223	13.85	13.85	0.21	1.02	0.12	0.44
Error estándar	L	0.102	0.107	2.35	2.35	0.24	1.30	0.04	0.13
	F	0.073	0.074	4.62	4.62	0.07	0.34	0.04	0.15
PHAEOZEM									
Promedio	L	6.98	6.68	20.27	79.73	3.01	9.22	0.76	0.86
	F	7.12	6.36	39.55	60.45	0.91	2.92	0.42	0.75
Máximo	L	7.35	6.95	28.13	84.13	3.83	14.7	0.97	1.34
	F	7.40	6.80	50.93	81.12	1.53	5.48	0.65	1.78
Mínimo	L	6.85	6.40	15.87	71.88	2.04	3.22	0.63	0.38
	F	6.80	6.20	18.88	48.55	0.39	0.84	0.21	0.50
Desviación estándar	L	0.176	0.185	4.28	4.28	0.59	4.06	0.11	0.32
	F	0.173	0.269	11.97	11.97	0.42	1.39	0.13	0.40
Error estándar	L	0.058	0.061	1.43	1.43	0.20	1.35	0.04	0.11
	F	0.057	0.089	3.99	3.99	0.14	0.46	0.04	0.13

Anexo 3. Estadística descriptiva de los análisis realizados a las muestras de suelo

Hz		pH H ₂ O	pH KCl	COT (g/kg)	Separación de fracciones (%)			CO Fracciones (%)			Porcentaje de agregados estables		
					Arenas	Limos	Arcillas	Arenas	Limos	Arcillas	Macro >2000µm	Macro 250- 2000µm	Micro <250µm
ALISOL													
Promedio	Ah1	5.2	5.13	37.02	15	75.98	4.16	9.48	6.55	85.74	71.85	22.75	2.97
	Ah2	5.5	5.02	19.35	17.22	74.18	4.44	7.07	5.96	83.76	47.73	35.10	6.51
Máximo	Ah1	5.6	5.4	51.03	26.09	79.8	6.17	11.98	9.43	142.93	89.85	54.52	5.18
	Ah2	5.8	5.5	33.1	23.71	81.23	8.34	8.41	7.26	162.81	62.44	61.41	13.38
Mínimo	Ah1	4.7	4.5	16	2.97	68.54	3.01	5.58	2.38	67.27	54.06	7.07	1.09
	Ah2	4.9	4.6	10	11.8	68.44	2.58	5.41	4.54	40.38	21.95	17.61	2.27
Desviación estándar	Ah1	0.346	0.272	11.76	5.95	3.73	0.915	1.93	2.06	31.44	12.09	15.25	1.89
	Ah2	0.281	0.311	8.27	3.43	2.98	1.53	1.13	1.98	44.37	16.94	14.18	3.76
Error estándar	Ah1	0.115	0.090	3.92	1.40	0.88	0.22	0.64	0.68	10.47	4.03	5.08	0.63
	Ah2	0.094	0.104	2.76	0.81	0.70	0.36	0.38	0.66	14.79	5.64	4.73	1.25
PHAEOZEM													
Promedio	Ah1	6.05	5.47	58.81	9.03	81.59	5.86	15.46	9.14	88.98	76.44	16.37	1.06
	Ah2	6.18	5.56	40.88	9.86	78.31	6.9	11.14	7.52	62.66	66.68	23.90	2.13
Máximo	Ah1	6.3	5.6	80.05	12.96	84.28	8.88	24.38	11.74	164.59	92.45	27.81	1.74
	Ah2	6.35	5.8	95.06	13.08	83.92	9.22	21.60	11.65	94.74	82.70	41.65	3.18
Mínimo	Ah1	5.4	5.1	35.02	7.73	76.25	4.42	5.84	5.82	16.94	60.84	4.73	0.48
	Ah2	5.8	5.4	18.01	8.42	58.48	5.46	4.37	4.11	32.20	47.96	11.19	0.85
Desviación estándar	Ah1	0.264	0.144	17.97	1.19	3.03	1.19	6.03	2.18	44.54	9.85	7.13	0.51
	Ah2	0.199	0.128	25.09	1.18	5.92	1.12	6.06	3.21	20.94	4.82	11.26	1.00
Error estándar	Ah1	0.088	0.048	5.99	0.28	0.71	0.28	2.01	0.72	14.84	3.28	2.38	0.17
	Ah2	0.075	0.048	9.5	0.31	1.58	0.29	2.29	1.21	7.93	4.82	4.25	0.38

CO: carbono orgánico

COT: carbono orgánico total