



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**Estabilidad de agregados y materia orgánica
en suelos de un bosque mesófilo de montaña
en la Sierra Norte de Oaxaca**

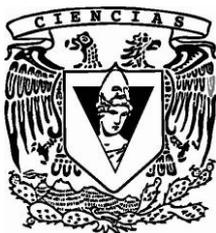
T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

BIÓLOGA

P R E S E N T A:

ALICIA LASSO TRINIDAD



**DIRECTOR DE TESIS:
DRA. NORMA EUGENIA GARCÍA CALDERÓN
2010**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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

Hoja de datos del jurado

1. Datos del alumno

Lasso

Trinidad

Alicia

56 45 31 30

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ciencias

Biología

09916579-4

2. Datos del tutor

Dra.

Norma Eugenia

García

Calderón

3. Datos del sinodal 1

Dra. Silke

Cram

Heydrich

4. Datos del sinodal 2

M. en C.

Elizabeth

Fuentes

Romero

5. Datos del sinodal 3

Dra. Amada Laura

Reyes

Ortigoza

6. Datos del sinodal 4

M. en C.

María del Socorro

Galicia

Palacios

7. Datos del trabajo escrito

Estabilidad de agregados y materia orgánica en suelos de un bosque mesófilo de montaña en la Sierra Norte de Oaxaca.

71pp

2010

A mi madre.....
mi ejemplo más grande de vida.

AGRADECIMIENTOS

A mi madre, el motor fundamental de mi vida, mi fortaleza.... gracias por enseñarme a luchar por lo que uno quiere, por estar siempre conmigo, por ser mi mamá. Tu gran esfuerzo valió la pena.... Gracias a ti lo he logrado.

A mis abuelos Alicia (†) y Ernesto (†), por darme a la mejor mamá del mundo, por enseñarme el amor a la tierra !!!

A mis hermanos...Benja, Isa, Gris, Hugo, Noe, Noemí, Dani, Cita, Omar, y Lilis, gracias por ser lo que somos....

A mis tíos y tías Max y Reina; Beto y Agustina; Salo y Tere, Cata y Jaime, Pedro, Petrona, Soledad y Mary.

A mis niños Paulina, Ernesto, Miriam, Oscar, Enrique, Reina, Linnette y Fidel, por llegar a mi vida y llenarla de alegría, por recordarme lo que es la inocencia.

A la More, sabes que también eres mi ejemplo....

Al Ing. Salvador Sánchez, mi novio, por compartir su tiempo conmigo, por esos momentos hermosos que me ha regalado, por su comprensión, por su apoyo, por quererme tanto como yo lo quiero.

A mis grandes amigas la Biol. Liliana y la P.de Biol. Maira ... por su amistad, por todos los grandes momentos que hemos compartido... Gracias chicas !!! ...

A mi papá, porque sin estar, siempre estuvo conmigo.

A la Dra. Norma E. García Calderón, por la oportunidad de realizar este trabajo, por las enseñanzas que he aprendido, por su tiempo y observaciones realizadas al mismo.

A la M. en C. Elizabeth Fuentes Romero, por sus enseñanzas, el conocimiento transmitido, por la revisión y comentarios a este trabajo, pero sobretodo por su amistad...

Al resto del jurado revisor del trabajo, la Dra. Silke, la Dra. Amada Laura, la M. en C. María del Socorro, por sus acertados comentarios y sugerencias que ayudaron a enriquecer este trabajo.

Al M. en C. Abel y al Dr. Gustavo y al Dr. Pavel Krasilnikov por sus enseñanzas y su amistad.

A la comunidad de Santa Cruz Tepetotutla, por las facilidades brindadas en la realización de este trabajo.

A todo el personal del Laboratorio de Edafología “Nicolás Aguilera” de la Facultad de Ciencias.

Quiero agradecer de manera especial a los proyectos PAPIIT- IN2169063 e IN104807 que permitieron la realización de esta tesis.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por ser literalmente mi segunda casa.

A todas aquellas personas que de alguna u otra manera han contribuido en la culminación de esta etapa de mi vida. Gracias !!!

Mi Oaxaca
Jorge Sanjuan
(fragmento)

Mi Oaxaca tierra sagrada,
tierra fértil y pura,
tú me viste nacer de mañana,
y esa mañana yo descubrí tu hermosura.

Oaxaca te pusieron por nombre
y fuiste escogida por mis antepasados
porque en ti encontraron esa paz absoluta,
esa paz que de ti siempre he anhelado.

ÍNDICE

HOJA DE DATOS DEL JURADO.....	2
AGRADECIMIENTOS.....	4
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	9
1. 1 Justificación.....	11
1.2 Objetivos.....	11
1.2 Hipótesis.....	11
CAPÍTULO II. MARCO TEORICO.....	12
2.1 Suelos forestales.....	12
2.2 Mantillo forestal.....	14
2.3 La Materia Orgánica.....	18
2.4 Importancia de la estructura de los suelos forestales.....	19
2.5 Proceso de formación de agregados en suelos forestales.....	20
2.6 Los Bosques Mesófilos de Montaña.....	23
CAPÍTULO III. SITIO DE ESTUDIO.....	27
3.1 Localización.....	27
3.2 Fisiografía.....	28
3.3 Geología.....	29
3.4 Clima.....	29
3.5 Hidrología.....	30
3.6 Vegetación.....	30
3.7 Suelos.....	31
3.8 Sitios de estudio.....	32
CAPÍTULO IV. MATERIALES Y METODOS.....	36
4.1 Establecimiento de los sitios de muestreo.....	36
Muestreo de mantillo forestal.....	37
Muestreo de suelo.....	37
4.2 Metodología del laboratorio.....	37
4.2.1 Análisis de mantillo.....	38
Análisis físicos.....	38
Análisis químicos.....	38
4.2.2 Análisis de suelo.....	39
Análisis Químicos.....	39
4.2.3 Análisis de agregados.....	40
Análisis químicos.....	40
4.3 Análisis de resultados.....	42

CAPÍTULO V. RESULTADOS	43
5.1 Resultados del mantillo	43
5.2 Resultados de los agregados	49
5.3 Correlaciones	54
CAPÍTULO VI. DISCUSIÓN.....	55
6.1 Estabilidad del carbono orgánico en el mantillo	55
6.2 Estabilidad del carbono en suelos.....	58
CONCLUSIONES.....	63
BIBLIOGRAFÍA.....	64

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Los Bosques Mesófilos de Montaña (BMM), son considerados por varios autores como relictos de vegetación, situación que hace muy interesante el estudio de estos ecosistemas, quienes albergan a especies endémicas y una gran cantidad de biodiversidad, lo que los hace colocarse dentro de los 5 primeros ecosistemas con mayor diversidad de especies (Luna - Vega *et al.* 2001).

Los procesos pedogenéticos que ocurren en los BMM son diferentes a los que se presentan en otros suelos forestales, esto debido a las particularidades en sus variables climáticas y de localización; una de sus principales características medioambientales es que reciben continuamente un aporte de humedad de diferentes fuentes, lo que repercute de distintas maneras en los procesos que se desarrollan en los suelos de estos bosques (Bruijnzeel y Veneklaas 1998). En estos ecosistemas los suelos, presentan mantillos forestales muy gruesos, debido a las tasas lentas de descomposición lo que permite que se acumule la hojarasca formando así horizontes orgánicos muy gruesos (Stadmüller 1987), por lo que la Materia Orgánica (MO) que se introduce al suelo no se transforma rápidamente como sucede en los ecosistemas tropicales, sino que la fauna edáfica comienza con la desintegración de la hojarasca y después ésta comenzará a ser descompuesta por los microorganismos, pero de manera más lenta, desde entonces hasta su incorporación en el suelo, esta en especie de “almacén” (Ordoñez 1999).

Los horizontes orgánicos que se van acumulando y transformándose en el suelo, contienen una gran proporción de nutrientes extraídos del suelo por los árboles que al

descomponerse se liberaran para volver a ser reutilizados y serán la materia prima para los procesos que van a estabilizar el carbono a partir de la descomposición de la MO, que interviene entre otras cosas en la formación y estructuración del suelo y la regulación del pH (Pritchett 1991, Guggenberger 2005).

Los restos recién desintegrados del mantillo de tamaño y densidad pequeños constituyen la Materia Orgánica Particulada (MOP) (Kögel-Knaber *et al.* 2008) los cuales son considerados como precursores de la formación de los agregados, y que al seguirse uniendo por la acción de los microorganismos y la intervención de las raíces, formaran los agregados de diferentes tamaños para finalmente dar como resultado la estructura del suelo (Six *et al.* 2002).

Los tamaños pequeños de agregados, se mencionan como almacenes de carbono a largo plazo (Buyanovski *et al.* 1994), es decir, la MO o la forma más general de ésta que es el carbono orgánico, queda inmerso dentro de los agregados quedando de esta manera menos disponible para la edafofauna, la actividad enzimática de los microorganismos y los factores climáticos que influyen para su mineralización, siguiendo así la ruta de la humificación, por lo que se puede inferir que el suelo esta secuestrando parte del carbono potencialmente mineralizable (Six *et al.* 2002).

1.1 Justificación

Los suelos forestales son importantes en el mantenimiento y conservación de los recursos naturales, en particular en el Bosque Mesófilo de Montaña de nuestro país, se conoce muy poco acerca de sus recursos edáficos, debido a esto es de suma importancia conocer los diferentes procesos que se llevan a cabo en estos bosques, específicamente es importante conocer los agentes que intervienen en la agregación del suelo para estabilizar el carbono orgánico de este ecosistema.

1.2 Objetivos

- General

Conocer la forma de estabilización del carbono en el suelo de un Bosque Mesófilo de Montaña (BMM) de la Sierra Norte de Oaxaca (SNO)

- Particulares

-Conocer la forma de estabilización del carbono en el mantillo en un BMM en la SNO

-Caracterizar la calidad (considerando el pH y contenido de bases) de los residuos orgánicos en dos sitios del BMM de la SNO

-Conocer las principales formas de estructuración del suelo del BMM de la SNO

-Conocer el grado de estabilidad de los agregados del suelo en cada sitio

-Conocer la relación del contenido de carbono orgánico (CO) en las fracciones minerales del suelo con la estabilidad de los agregados en cada sitio

1.2 Hipótesis

- Si el mantillo forestal es desarrollado, entonces el carbono orgánico tiende a estabilizarse por inmovilización.
- A mayor estabilidad de agregados, se espera una mayor estabilidad del carbono.

CAPÍTULO II

MARCO TEORICO

2.1 Suelos forestales

Los suelos forestales templados tienen diferencias con respecto a los suelos forestales tropicales o de selvas, se considera que un ecosistema forestal templado es una comunidad donde la forma dominante de la vegetación natural son los árboles, que interactúan con su ambiente físico y tienen un efecto profundo sobre los suelos, debido a la manera en que toman sus nutrientes, las grandes raíces que desarrollan, de manera especial la capa forestal superficial que resulta proporciona un microclima y un espectro de microorganismos diferentes a los relacionados con otros suelos, y los ácidos orgánicos que se liberan de estos residuos en descomposición y la subsecuente lixiviación de sus bases constituyen el carácter distintivo de los suelos forestales (Fisher y Binkley 2000, Pritchett 1991)

El suelo en cualquier sitio cumple con ciertas funciones, en los ecosistemas forestales además, constituye un medio poroso y permeable apto para la regulación del sistema hidrológico, influyendo así en la retención y pérdida de humedad. Asimismo, constituye el medio donde se realizan los ciclos biogeoquímicos necesarios para la reincorporación de los compuestos orgánicos.

Para los bosques templados se describen una gran variedad de suelos, algunos presentan un fuerte desarrollo con lixiviación o eluviación de arcillas; otros muestran un moderado intemperismo. Otro grupo de suelos característicos presentan propiedades que están determinadas por su fracción coloidal (arcilla y materia orgánica), como los Andosoles. Sin embargo, los suelos dominantes que sustentan a los bosques templados en nuestro país se

caracterizan como someros, con un incipiente desarrollo, como son los Leptosoles y Regosoles, los cuales mantienen en forma conjunta al 58.6% del bosque templado (Cotler 2003). El perfil *tipo* de suelo para un bosque sería el siguiente: una capa orgánica (horizonte O), una horizonte mineral enriquecido en materia orgánica (horizonte A), un horizonte de eluviación (E), un horizonte de iluviación o de acumulación (B), y bajo éste un horizonte mineral (C) con evidencias de intemperismo por los procesos formadores de suelos sobre sus minerales primarios (Fisher y Binkley 2000).

Para los suelos de los Bosques Mesófilo de Montaña los procesos formadores del suelo, que predominan son la podsolización y la ferralitización, el primero es más común que suceda en las áreas boreales, es un proceso en el que la producción de los ácidos orgánicos que forma complejos solubles con el aluminio o el hierro aumentando la meteorización. Éste proceso ocurre principalmente bajo condiciones donde se desarrolla un mantillo tipo mor, debajo de éste hay una horizonte eluvial (E) que tiene bajo contenido de bases, más Al y Fe que el material parental y ésta enriquecido en sílice, con la consecuente acumulación de MO y sesquióxidos subyacentes formando un horizonte iluvial Bh o Bs (Buurman y Jongmans 2002, Lundström *et al.* 2002, Fisher y Binkley 2000). La ferralitización, ocurre en los suelos forestales de las zonas tropicales, donde la alta precipitación y las altas temperaturas, favorecen la pérdida de sílice y la inmovilización del fierro como óxidos de fierro (Stadmüller 1987).

Los bosques forestales templados fungen como almacenes de carbono, de acuerdo a Ordoñez (1999) éste se puede almacenar en las hojas (biomasa aérea y la biomasa de las raíces), en la materia orgánica en descomposición, en el suelo y también se encuentra almacenado como el carbono en productos (hojas, madera) y como el carbono ahorrado por sustitución de energías fósiles (bioenergía), los cuales finalmente de una o de otra manera

volverán a entrar al ciclo. De manera general, la vegetación toma el CO₂ de la atmósfera, vía la fotosíntesis y lo utiliza para elaborar azúcares y otros compuestos orgánicos necesarios para su crecimiento y metabolismo, los árboles de madera de larga vida almacenan el carbono en la madera y en otros tejidos hasta su muerte cuando empiezan a descomponerse, después pueden liberar el carbono de su madera a la atmósfera como CO₂, CO o CH₄ éste puede integrarse al suelo como MO (Bishop y Landell-Mills 2003).

2.2 Mantillo forestal

Los residuos de la vegetación que se concentran en el suelo después de caer, constituyen en su mayoría los recursos primarios para la transformación de la MO en el suelo, dependiendo de la cantidad de hojarasca y la calidad de los residuos (Álvarez-Sánchez y Harmon 2003). Cerca del 60% de las reservas totales de carbono en los ambientes forestales se localizan en el mantillo forestal y en el suelo mineral (Schöning *et al.* 2006), ésta capa orgánica de suelo se introduce a manera de calificador en la clasificación formal de los grupos de suelo (horizonte fólico), en las últimas décadas algunos investigadores han realizado recomendaciones para retomar conceptos previos y poder clasificar el tipo de mantillo y a sus horizontes como Broll *et al.* (2006).

Se le han dado diferentes denominaciones al tipo de mantillo de los suelos forestales, debido a los diferentes procesos que influyen su transformación como son: las condiciones microclimáticas, la humedad y la temperatura particular en cada bosque (Mungai y Motavilli 2006, Jabiol *et al.* 2004), además de las características químicas de la hojarasca (el pH y la relación C:N) y la fauna desintegradora (Álvarez-Sánchez y Harmon 2003). Los horizontes que sirven para clasificar al mantillo se presentan en el cuadro 2.2.1, con respecto a la nomenclatura de los horizontes orgánicos, las diversas escuelas tienen distintas nomenclaturas por lo que dependiendo de la literatura los horizontes pueden estar

enunciados de distintas maneras, OL (L, O₁, O_a); OF (F, O₂, O_e) y el OH (Oh, O₃, u O_i), en la WRB 2007 éstos horizontes se convierten en calificadores para poder realizar una correcta clasificación de los suelos.

Cuadro 2.2.1. Descripción de los horizontes orgánicos que se pueden encontrar en suelos forestales

Horizontes orgánicos	
OL Mantillo (litter)	Residuos poco alterados de un color pardo
OF Fragmentado	Los residuos están degradados de manera parcial más avanzada, pero aun se puede identificar su origen
OH Humificado	Los residuos ya se están integrando a la fracción mineral del suelo

De acuerdo a diversos autores como Broll *et al.* 2006, Mungai y Motavalli 2006, Guggenberger 2005, Jabiol *et al.* 2004, Ponge 2003 el mantillo de manera general puede ser de tipo mull, moder o mor y su descripción es como sigue:

- El mantillo tipo mull puede o no presentar los horizontes OL y OF, ya que la alta actividad biológica hace que la humificación y la mineralización se lleven a cabo de manera rápida, debajo de este el horizonte A, puede tener gran abundancia de raíces y su estructura puede ser migajosa o granular y se da en condiciones de pH con valores de entre 6 y 7 ya que en este rango la tasa de actividad biológica es más activa, puede haber presencia de lombrices, bacterias y hongos con especies saprofíticas y micorrizas; la presencia de fenoles es muy baja. Este tipo de humus esta asociado a los suelos más fértiles, por lo que el estrato herbáceo que soporta es muy diversificado.

- El mantillo tipo moder, presenta los horizontes OL, OF y OH, con transiciones graduales entre ellos, y el horizonte mineral sobre el que se establecen, pueden ser de un amplio espesor, ya que no presentan gran actividad biológica y la velocidad de transformación de los restos vegetales es más lenta y en general se da en condiciones ácidas y debido a esto

presenta también hongos y casi no hay bacterias; presenta altos contenidos de terpenos y fenoles.

- El mantillo tipo mor, cuenta con los mismos horizontes OL, OF y OH, pero el espesor del horizonte OH es menor que el del tipo moder, la incorporación de la MO, es casi nula, y presenta condiciones más ácidas que el moder. Se caracteriza por escasas de micro y macro fauna, los hongos presentes son del tipo de los ascomicetos; los valores de nutrientes de este tipo de mantillo son bajos, por lo que la vegetación no es muy variada. Presenta altos contenidos de fenoles, lo que repercute en la velocidad de descomposición de la MOS.

Después del proceso de acumulación de la hojarasca, sigue el proceso de la descomposición hasta llegar a la mineralización y/o humificación; a partir de ésta última se dará lugar a la incorporación de los compuestos hacia los horizontes más profundos del suelo. La descomposición de la hojarasca, está controlada por tres principales factores, el clima, la calidad de la hojarasca y la abundancia de los organismos descomponedores (Coûteaux *et al.* 1995), de este mantillo que se está descomponiendo los microorganismos edáficos toman la energía y los nutrientes necesarios para sus funciones; además la hojarasca funciona a manera de hábitat para muchos de ellos (Guggenberger 2005, Ponge 2003).

La hojarasca se va descomponiendo de manera tal que los elementos contenidos en ella y que entraran al flujo biogeoquímico, se van liberando a la solución del suelo, por la secuencia enzimática de los ciclos tróficos (Tapia-Coral *et al.* 2005, Ponge 2003) esto puede comenzar desde que las hojas están en los árboles, pues con la constante lluvia los compuestos se solubilizan y los elementos más lábiles se van desprendiendo (Stadtmüller 1987), al caer las hojas y acumularse en el suelo comienza el proceso del ciclaje de

nutrientes, y en condiciones de exceso de humedad se favorece la pérdida de elementos por lixiviación que en algunos bosques es como sigue Na, K, Ca y Mg. (Attiwill 1968).

La calidad del mantillo depende de factores como el clima, las especies de arboles y del suministro de nutrientes en el suelo, se menciona que la principal diferencia entre los árboles deciduos y las coníferas se da en los contenidos de lignina y hemicelulosa. En algunas especies el contenido de Na y K en la solución del suelo es también un indicador de la calidad del mantillo, por lo que el K como macronutriente puede ser usado como un índice de la riqueza de los cationes en el mantillo, en bosques con valores bajos de pH (García-Calderón *et al.* 2008).

Las bacterias presentes casi en cualquier ambiente, también intervienen en la desintegración de la hojarasca, siendo el grupo dominante en el suelo, las cuales toman los nutrientes de la solución del suelo, después de este grupo se encuentran los hongos, quienes en los ambientes húmedos de montaña y de las zonas más frías pueden ser los principales microorganismos degradadores, aun por encima de las bacterias, pues están adaptados a las condiciones de acidez que presenta el mantillo forestal (Mungai y Motavilli 2006, Ponge 2003, Jenn-Shing y Chiu 2000, Hilell 1998) aunado a esto sus hifas pueden crecer hasta alcanzar distancias considerables, lo que les da mayor cobertura de degradación, su actividad se basa en la asimilación del carbono directamente del mantillo, además de que sus vías de asimilación de compuestos como la lignina y los ácidos húmicos son más eficientes. Dentro de la fauna descomponedora en estos ambientes podemos encontrar también enquitreidos, ácaros y algunos colémbolos, así como algunos nemátodos (Stefan *et al.* 2005).

2.3 La Materia Orgánica

La Materia Orgánica (MO) se acumula en los suelos por incorporaciones de residuos vegetales a nivel de rizosfera y por la caída de las hojas, frutos, cortezas de los árboles, residuos microbianos y productos de descomposición de la micro y macro fauna, que serán incorporados al suelo a diferentes tasas de velocidad, dependiendo de los factores abióticos como el clima, la precipitación y la temperatura (Six *et al.* 2002).

A partir de la MO se obtiene la evaluación del contenido de carbono orgánico total (COT), el impacto de la MO sobre la estructura del suelo es frecuentemente descrito usando este parámetro. La estructura y la estabilidad del suelo se incrementan al aumentar la MO, pues actúa como regulador del pH y favorece la aireación además actúa como cementante lo que aumenta la cantidad de agregados y esto a su vez permite la óptima circulación de aire y humedad, mejora la capilaridad y permeabilidad de suelos (Swift 2001). Los niveles apropiados de MO ayudan a la fertilidad del suelo y minimizan los efectos de la agricultura, reduciendo la erosión además de ayudar a preservar la biodiversidad (Six *et al.* 2002).

Esta MO se fermenta por la acción de los microorganismos, formándose compuestos quelantes, ácidos húmicos (AH), ácidos fúlvicos (AF), huminas, aminoácidos de bajo y alto peso molecular, azúcares, grasas, ceras y proteínas (White 2006, Fisher y Binkley 2000) que se incorporan hacia el perfil del suelo.

El carbono es el elemento fundamental de la MO, al incrementar la capacidad de los suelos para secuestrar carbono se puede aminorar el incremento en los niveles de CO₂ en la atmósfera, éste potencial de secuestro de un suelo en particular depende de la vegetación con la que cuenta, su composición mineralógica, la profundidad, el drenaje, la disponibilidad de agua y aire y la temperatura del medio, además de las características

químicas de la MO y su capacidad para resistir a la descomposición microbiana (White 2006, Gobat 2004) .

Six *et al.* (2002), menciona que hay tres principales mecanismos por los cuales el carbono se puede estabilizar: la estabilización bioquímica, la estabilización por asociación con partículas como los limos y las arcillas y la protección física dentro de la estructura del suelo.

En los últimos años se ha dado un mayor interés en entender como se puede estabilizar la MO para ayudar a incrementar los niveles de fertilidad y la conservación del suelo, además de tener en cuenta que el suelo es un sumidero de carbono, lo que atrae a los estudios de cambio climático (Swift 2001).

2.4 Importancia de la estructura de los suelos forestales

El suelo puede ser un cuerpo inestable o puede ser un cuerpo estructurado de partículas que se entrelazan con formas y tallas regulares. La manera en que las partículas se empaquetan formando una red especial es comúnmente llamada la matriz del suelo (Porta *et al.* 1999, Hillel 1998). Esto es la estructura del suelo, el arreglo u organización de las partículas del suelo, aunque es un concepto básicamente cualitativo.

En el suelo la estructura afecta el contenido y la transmisión de aire y agua dentro de éste, tiene influencia también en las propiedades mecánicas que pueden afectar fenómenos como la emergencia de la semilla, la germinación, el crecimiento de la raíz y un suelo que pierde la estructura puede incrementar la velocidad de la erosión, además es afectada fuertemente por cambios en el clima, la actividad biológica, las prácticas de manejo de suelo y es vulnerable a las fuerzas destructivas de naturaleza mecánica y fisicoquímica (Nieder y

Benbi 2008, Six *et al.* 2001, Hillel 1998). La preservación de una adecuada estructura en el suelo, es importante para la preservación de las reservas de MO (Swift 2001).

En el suelo se reconocen básicamente tres tipos de agrupación de sus fracciones: la masiva, donde las partículas se pueden encontrar en bloques largos y cohesivos y en la mayoría de los casos presentan elevadas proporciones de arcilla; los suelos sin estructura, o suelos no consolidados, pues sus partículas suelen estar sueltas y sin adhesión, y por último la estructura en agregados, que es la media entre los dos anteriores, donde las partículas están asociadas en pequeños terrones cuasi-estables conocidos como agregados o peds.

2.5 Proceso de formación de agregados en suelos forestales

Six *et al.* (2002) proponen que el material fresco recién caído del dosel, después de comenzar a desintegrarse al que llama materia orgánica particulada (MOP) actúa como núcleo para ser colonizado por los hongos, y otros microorganismos edáficos, esto resultara en la producción de polisacáridos extracelulares que unirán a los residuos de la MOP con las partículas del suelo, resultando un macroagregado ($\geq 2000\mu\text{m}$). Siguiendo con la incorporación de residuos recién caídos del dosel los microorganismos utilizan las sustancias resultantes de su metabolismo, así la MOP continuara degradándose de lo que resultará que la MOP sea descompuesta y fragmentada en partículas más pequeñas, éstas al igual que las fracciones mas grandes se continuaran uniendo con las partículas del suelo, formando en este caso a los microagregados ($\leq 250 \mu\text{m}$), dentro de los macroagregados. Cuando comienzan a perder resistencia los agentes cementantes de los macroagregados se fracturan y se liberaran los microagregados, junto con la MOP residual más recalcitrante, iniciando de nuevo el ciclo. Este proceso conlleva a la formación de nuevos agregados de manera que los que unen se van degradando y la estabilidad de éstos va decreciendo dejando pequeños agregados (Golchin *et al.*, 1995).

Nieder y Benbi (2008), Swift (2001) y Hillel (1998) mencionan a los polisacáridos sintetizados de la fauna microbiana, además de los polímeros naturales como importantes también para el inicio de la formación de los agregados, aunado a la formación de los complejos organominerales los cuales son esenciales en la estabilización y formación de los agregados, estos procesos de estabilización incluyen interacciones entre los componentes de la MO y las partículas minerales que tienen lugar a niveles moleculares. Estos materiales se adhieren a la superficie de la arcilla por medio de puentes de cationes, los enlaces de hidrógeno, las fuerzas de van der Waals, y la adsorción de los aniones; algunos polímeros orgánicos penetran entre las arcillas pero forman una capa que protege a los agregados del suelo y con algunos materiales inorgánicos, por lo que la textura del suelo o la presencia de algunas fracciones, tiene un papel importante en la formación de los agregados al igual que el carbonato de calcio y los óxidos de hierro y aluminio que actúan como cementantes (Porta *et al*, 1999, Hillel 1998).

Otro elemento fundamental en la agregación es el clima, el cual juega un rol muy importante en la estabilidad de los agregados, en lugares con climas extremos los ciclos de congelación-descongelación pueden influir ampliamente en los agregados, las lluvias constantes pueden diluir las sustancias cementantes y las altas temperaturas pueden incrementar la cementación de las partículas (Hillel 1998).

Es importante mencionar el rol que juegan las raíces en el suelo, ya que son un importante elemento en la estabilización de los agregados del suelo sobre todo de los macroagregados, éstas se enredan entre estos, ejerciendo cierta presión que los comprime y los separan unos de otros (Nieder y Benbi 2008).

Los agregados se clasifican en diferentes tamaños, los que son visibles y que son del orden de los milímetros a los centímetros en diámetro, son llamados peds o macroagregados estos pueden ser mayores de 250 μm , y los microagregados que van de los 20 a los 250 μm (Hillel 1998, Golchin *et al.* 1995).

Los agregados protegen al C, y al N ya que protegen a la materia orgánica del suelo (MOS) formando una barrera entre los microorganismos y sus enzimas, así como sus sustratos, controlando sus complejas interacciones, sobre todo en los microagregados más pequeños por lo tanto son considerados como almacén de los elementos y de la MOS (Buyanovski *et al.* 1994, Golchin *et al.* 1995). Y se ha observado que hay una buena correlación entre los niveles de MOS y la estabilidad de los agregados (Swift 2001).

La distribución de los agregados estables de acuerdo a sus tamaños es determinante para tener una idea de la porosidad del suelo, y nos sirve para saber acerca del grado de erosión en la superficie del suelo, y de manera indirecta puede darnos una idea de la disponibilidad del carbono que se está guardando en ellos a diferentes tiempos (Buyanovski *et al.* 1994). La clasificación de los agregados debe ser *in situ* para darse una idea más clara del modo en que están arreglados.

En el suelo la estabilidad de los agregados es una medida de su vulnerabilidad, es decir, expresa la resistencia que tienen los agregados a romperse cuando son sometidos a procesos naturales, tales como las gotas de lluvia, el viento, los cambios bruscos de temperatura etc.

Las formas de agrupación de los agregados en el suelo son las siguientes (Fisher y Binkley 2000, Porta *et al.* 1999, Hillel 1998):

- Laminar: son capas horizontales, delgadas y planas. Son estructuras que ocurren en los depósitos recientes de arcillas. Estas se traslapan frecuentemente disminuyendo la permeabilidad.
- Prismática o columnar: son pilares orientados verticalmente, por lo regular de seis lados, son comunes en el horizonte B de suelos arcillosos, particularmente en regiones de clima semiárido. Cuando los bordes son lisos son prismáticos y cuando son redondeados son columnares.
- Bloque: son como los cubos, por arriba de los 10 cm. en talla, algunas veces tienen bordes angulares con caras definidas, estas estructuras son comunes en la parte superior del horizonte B.
- Esférica: son agregados redondeados, de 2 cm. en diámetro, que se encuentran en condiciones de no compactación en el horizonte A, estas unidades también reciben el nombre de gránulos.

Las formas, tallas y las densidades de los agregados varían a lo largo del perfil, al aumentar la profundidad, la humedad va disminuyendo hacia abajo con lo que los agregados de los horizontes más profundos serán más compactos y más grandes o se pueden encontrar en un gran bloque con estructura masiva. La estructura de los agregados del suelo puede hacerse en términos cualitativos especificando el tipo de formas que presentan en los perfiles de suelo en los respectivos horizontes; y en términos cuantitativos hay que medirlos (Hillel 1998).

2.6 Los Bosques Mesófilos de Montaña

El BMM incluye a varias comunidades forestales que comparten características fisonómicas, ecológicas, climáticas y florísticas. Debido a esto se les conoce con diferentes nombres, algunos hacen énfasis a sus características climáticas como, Bosque Montano Lluvioso Alto o Bajo, Bosque Tropical Lluvioso, Bosque de Elfin, Bosque Tropical

Montano Nuboso, Bosques Tropicales Húmedos de Montaña, entre otros (Rincón 2007, Arellanes 2000, Stadtmüller 1987).

La historia biogeográfica de los BMM muestra que la distribución de este tipo de bosque está conformada por numerosas islas, por lo que podemos encontrar una amplia distribución de especies endémicas, por estas razones este ecosistema ocupa el segundo lugar en biodiversidad mundial después de la selva tropical (Luna- Vega *et al.* 2001, Gallardo 1998, Webster 1995, Rzedoski 1978).

A este tipo de bosque se le considera relictos de vegetación, ya que es un banco de germoplasma vegetal y animal, además de ser uno de los mayores ecosistemas captadores de agua debido a la característica de los materiales en los que se encuentra (Arellanes 2000, Velázquez 1997).

Fisionómicamente son bosques muy densos, con elementos arbóreos cuyas alturas varían de 15 a los 50 m, el diámetro del tronco de los árboles pueden alcanzar hasta los 2 metros pero la media es de entre 30 y 50 cm, la mayoría de las especies presentan hojas esclerófilas. Estos bosques son de estructura compleja se pueden reconocer varios estratos arbustivos y el herbáceo puede estar poco desarrollado ya que la vegetación densa de las partes de arriba no deja pasar la luz, hacia los estratos inferiores, otra característica importante de este tipo de ecosistema es que nunca se puede ver completamente defoliado y gracias a las condiciones climáticas, sobre todo en las partes más altas la prevalencia de briofitas y las epífitas vasculares es casi permanente (Bautista-Cruz *et al.* 2003, Rzedowski 1978, Velázquez 1997).

Al hablar de las características climáticas de este tipo de ecosistemas es importante mencionar que la precipitación es uno de los factores característicos del BMM puede llegar a los 4000 mm por año; por definición la cubierta de nubes es casi continua lo que se conoce como precipitación horizontal y la neblina es un factor característico ya que se presenta durante gran parte del año y mantiene la atmósfera en punto de saturación, con una humedad relativa de cerca del 90%, lo que hace que le asignen el término hiperhúmeda (Bruijnzeel y Veneklaas 1998, Tanner 1980). La temperatura media anual disminuye con la altura en un gradiente que va desde los 18 a los 22 °C a 1000 m, hasta menos de 10 °C a 3000 m (Webster 1995).

Los suelos de estos bosques presentan variaciones importantes a través de los gradientes altitudinales. De manera general en las laderas de las zonas altas se presentan suelos someros, con pH ácido, con una gran cantidad de MO, con deficiencias en los contenidos de nitrógeno y fósforo y una baja saturación de bases, esto debe atribuirse principalmente a la gran cantidad de agua que recibe el suelo aunado a las temperaturas bajas del lugar lo que hace que se reduzca la tasa de descomposición y mineralización, el humus puede ser de tipo mor (Álvarez-Arteaga *et al.* 2008, Mungai y Motavilli 2006, Bautista- Cruz *et al.* 2003, Jenn-Shing y Chiu 2000, Velázquez 1997).

En nuestro país el BMM, corresponde al clima húmedo de altura y dentro de las comunidades que se establecen en las zonas montañosas del país ocupa sitios más húmedos que los bosques de *Pinus* y *Quercus* y más cálidos que los de *Abies*, pero que son más frescos que los tropicales. De acuerdo a las características ecológicas este tipo de vegetación se presenta frecuentemente en zonas con relieve accidentado y laderas pronunciadas, en muchas localidades se restringe a cañadas donde se resguarda de los vientos fuertes y la insolación (Rzedowski 1978). Es por ello que uno de los servicios

ambientales más importantes de estos ecosistemas es la captación de agua (Challenger 2003).

CAPÍTULO III

SITIO DE ESTUDIO

3.1 Localización

El estudio se llevó a cabo en la comunidad de Santa Cruz Tepetotutla, en el municipio de San Felipe Usila, perteneciente al distrito de Tuxtepec en el estado de Oaxaca, el sitio se localiza a los 17°38' - 17°40' Norte y 96°32' - 96°33' Oeste.

El estado de Oaxaca se encuentra ubicado en la porción sureste de la República Mexicana, con una superficie de 93 343 km² ocupa el 5° lugar en extensión nacional, y representa el 4.8% de la superficie nacional, limita al norte con los estados de Puebla y Veracruz, al este con el estado de Chiapas, al oeste con el estado de Guerrero y al sur con el Océano Pacífico (fig. 3.1.1). El estado se divide en 8 regiones económicas y políticamente en 30 distritos y 570 municipios (INEGI 2005, García-Mendoza *et al.* 2004).

La comunidad de Santa Cruz Tepetotutla está ubicada en la porción sur del municipio de San Felipe Usila, en la zona alta de la región conocida como la Chinantla, dentro de la cuenca del río Papaloapan (Anta y Mondragón 2006). La Chinantla es reconocida como una región hiperhúmeda que provoca una alta concentración de humedad ambiental y edáfica lo que conlleva procesos relacionados con una alta tasa de lavado del suelo y condiciones anaeróbicas, las tasas de transpiración por parte de la vegetación son más bajas en comparación con la vegetación de ambientes menos húmedos (Velázquez-Rosas *et al.* 2002).

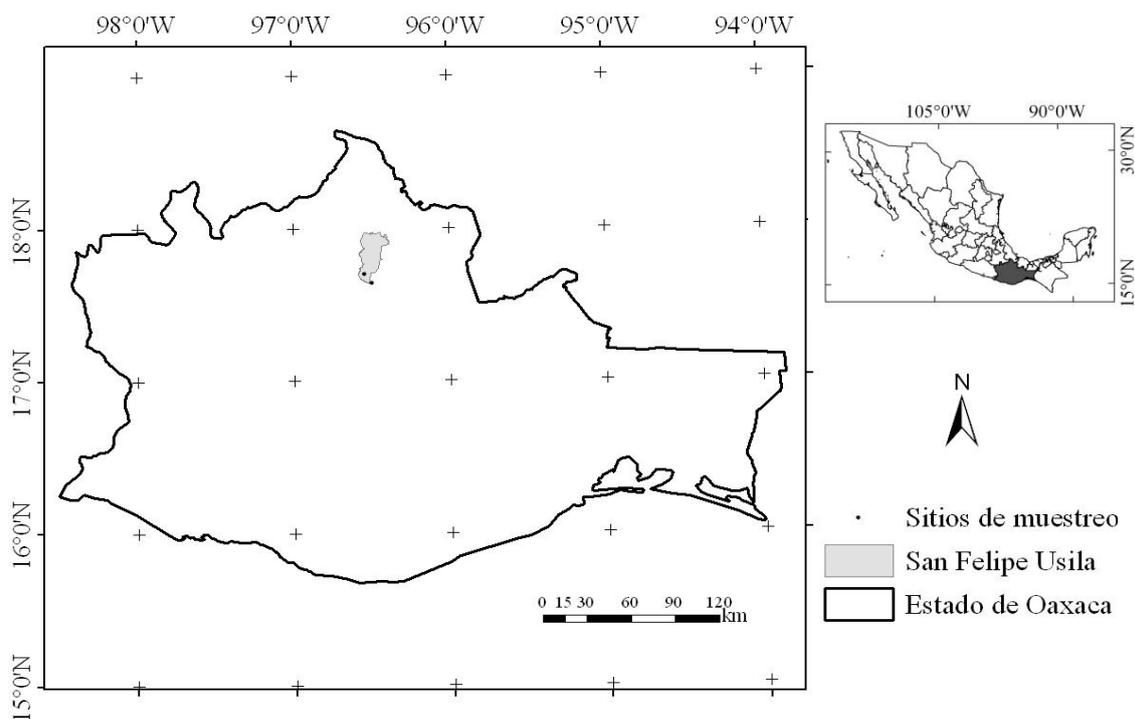


Figura 3.1.1 Ubicación geográfica de los sitios de muestreo en el municipio de San Felipe Usila, Estado de Oaxaca, México.

3.2 Fisiografía

La Chinantla, ubicada en la Sierra Norte de Oaxaca o Sierra Juárez, representa un parteaguas entre la vertiente del Golfo y la del Pacífico, se encuentra ubicada dentro de la provincia morfotectónica de la Sierra Madre del Sur (SMS), y pertenece a la subprovincia de las tierras altas de Oaxaca y Puebla de acuerdo a Ortiz *et al.* (2004) y a Ferrusquía (1995). Esta provincia abarca una superficie de 17 519.95km², por lo que es la segunda más grande en el estado.

El relieve de la SMS es sinuoso y abrupto se encuentra dominado por un conjunto de sierras y lomeríos con laderas inclinadas abruptamente. El municipio de San Felipe Usila, se encuentra modelado por laderas fuertes y medianas, además de sierras alargadas y grandes cañadas. En el área de Santa Cruz, el paisaje dominante lo establecen laderas con pendientes de entre 25 y 15° de inclinación, aunque hay zonas abruptas que alcanzan pendientes hasta de 35° (van der Wal 1996).

3.3 Geología

La edad de las rocas sobre las cuales se encuentra la Sierra Norte, es de cerca de 14 millones de años, y se ubican entre el paleozoico tardío y el mesozoico temprano. Esta cordillera se originó por procesos de fallamiento, en la falla de Oaxaca, que corre por el oeste del margen de la sierra. Esta zona en particular, es compleja y diversa, ya que se encuentra sobre un complejo monolítico, que consiste en rocas trituradas a lo largo de planos de falla, donde se encuentran rocas de origen volcánico que sufrieron procesos de metamorfismo en el mesozoico (Centeno-García 2004). Además se encuentra un complejo metamórfico, probablemente del paleozoico conformado por esquistos y limolitas (Anta y Mondragón 2006, Velázquez-Rosas *et al.* 2002, Velázquez 1997).

En el municipio de San Felipe Usila, de acuerdo a van der Wal (1996), la mayor parte de la superficie es ocupada por areniscas-conglomerados-limolitas, calizas y esquistos, y de forma más particular para Santa Cruz Tepetotula se presentan esquistos y areniscas.

3.4 Clima

La gran diversidad climática con la que cuenta el estado de Oaxaca, se debe a varias razones como a su posición geográfica ubicada al sur del trópico de Cáncer y su cercanía al Océano Pacífico; la gran complejidad del relieve debida a su historia geológica, lo que implica que las grandes montañas y los grandes macizos actúen de manera tal que se modifique el patrón de temperaturas y finalmente el efecto de las corrientes marinas que actúan modificando las temperaturas superficiales (Trejo 2004).

La zona se caracteriza con un tipo de clima C(fm)b(i) , templado de transición con lluvias todo el año, con precipitación del mes más seco del orden de los 40 mm y con una

oscilación anual de temperaturas medias mensuales menor de 5 °C (Velázquez-Rosas *et al.* 2002).

Las normales climáticas en la zona han sido registradas por la estación meteorológica de Vista Hermosa donde se ha registrado una precipitación media anual cerca del sitio de estudio de 5800 mm y la temperatura media anual de 16.5 °C (García-Calderón *et al.* 2008). Otro factor ambiental importante es la neblina, que es un proceso constante. La mayor parte del año se encuentra presente en la zona y contribuye a la conservación de la humedad del suelo y en la zona, se registran menos de 50 días despejados al año, se observan lluvias prácticamente durante todo el año, y aun en estación relativamente seca se presentan neblinas persistentes (Velázquez-Rosas *et al.*, 2002).

3.5 Hidrología

Los numerosos arroyos que se forman en la sierra alimentan al río Perfume que a su vez drena a la presa Cerro de Oro de donde las aguas continúan por el río Papaloapan hacia el Golfo de México; y al río Tlacuache, que son las mayores corrientes de agua de la zona, ambos pertenecen a la cuenca alta del Papaloapan (Anta y Mondragón 2006, Romero *et al.* 2000).

3.6 Vegetación

Para el estado de Oaxaca Torres (2004), menciona que se encuentran 26 tipos de vegetación entre los que se agrupan bosques, matorrales, selvas, vegetación acuática, esto es debido principalmente a sus características abióticas.

Uno de los tipos de vegetación que tiene relevancia dentro de las comunidades que se establecen en el estado es el Bosque Mesófilo de Montaña (BMM) que de manera general, se distribuye en laderas y cañadas húmedas de la Sierra Juárez, en los distritos de Ixtlán,

Tuxtepec y Villa Alta, y en otros sitios con serranías, donde predominan climas cálidos a semicálidos y templados húmedos con lluvias. Fisonómicamente forman bosques densos, con una rica composición florística, el estrato principal lo forman árboles de 7 a 20 m de altura de *Quercus candicans*, *Pinus patula*, *Liquidambar styraciflua*, *Weinmannia pinnata*, *Persea americana*, *Podocarpus matudea*, *Clethra sp.*, entre otras. El estrato inferior mide de 1.5 a 6 m de altura dominado por especies arbustivas. Una de las comunidades habituales dentro de este sistema son las especies trepadoras, las epífitas y las rupícolas.

Webster (1995), divide al BMM de acuerdo a los tipos de géneros que predominan y a la altitud en dos subtipos, el BMM alto que presenta géneros de preferencia templada, como el de *Alnus*, el de *Podocarpus*, *Drymis* y *Magnoliaceae* y el bajo que se caracteriza por un alto porcentaje de epífitas, helechos, palmas y taxas tropicales como el de *Anonaceae*, *Melastomataceae*, y *Cyclanthaceae*.

3.7 Suelos

Para el estado de Oaxaca, se registran 16 unidades de suelo, de las cuales son los Acrisoles y los Regosoles de los que se tiene más porcentaje con un 24.93 y 20.13% respectivamente, seguidos por los Luvisoles con un 13.98% y los Cambisoles con 9.44%. En el distrito de Tuxtepec, se tiene registrados un 24% de Litosoles, 22% de Acrisoles, 20% de Luvisoles y un 11% de Vertisoles (Alfaro 2004). En la comunidad de Santa Cruz Tepetotutla se han reportado de acuerdo a van der Wal (1996) 5 grupos de suelo, en alturas mayores a los 1600 msnm donde predominan los Podzoles, después los Oxisoles cerca de los 1400 msnm con y sin horizonte A, y para áreas más bajas están las Rendzinas o los suelos calci-magnésicos, y por debajo de éstos ya en los valles se desarrollan los suelos más fértiles, los Luvisoles (Álvarez-Arteaga *et al.* 2008).

Desde el punto de vista abiótico el BMM se desarrolla sobre suelos con abundante materia orgánica en los horizontes superiores, pueden ser someros o profundos, amarillos rojos o negruzcos, la textura puede ser de tipo arenosa a arcillosa, con pH ácido de 4 a 6. Una característica importante es que permanecen húmedos durante todo el año. Entre los procesos importantes que suceden en los suelos de estos bosques se mencionan el hidromorfismo y la podzolización (Álvarez- Arteaga *et al.* 2008, Schawe *et al.* 2007).

3.8 Sitios de estudio

El área de estudio se estableció en un gradiente altitudinal, del cual se eligieron dos puntos el Sitio 1 (S1) a los 2550 msnm y el sitio 2 a los 1550 msnm (S2) ver figura 3.8.3.

De manera particular para el sitio de estudio en la franja de mayor altitud a 2550 msnm se puede encontrar como tipo de vegetación el BMM donde la comunidad arbórea está representada por 22 especies, entre las más importantes están *Quercus ocoteifolia*, *Clethra galeottiana*, *Persea chanissonis*, *Ternstroemia oocarpa*, *Cleyera integrifolia*, y *Weinmannia tuerckheimii* (Álvarez- Arteaga *et al.* 2008, Rincón 2007) cubiertos de epífitas (líquenes y musgos) de menor tamaño que en la parte baja, los árboles van a ser de tamaño pequeños pero con mayor biomasa; esta altitud está en una zona de menor exposición al viento, la temperatura media anual es de 11.5 °C variando desde -2.0 a 34.4 °C (Álvarez- Arteaga *et al.* 2008) (Figura 3.8.1).



Figura 3.8.1. Sitio 1. Fotografía del BBM de la Sierra Norte de Oaxaca a 2550 msnm de la comunidad de Santa Cruz Tepetotutla. Se observan las epífitas sobre los troncos de *Quercus ocoteofolia* los árboles y el estrato herbáceo abundante.

En este sitio los suelos se han caracterizado de acuerdo a Álvarez- Arteaga *et al.* (2008) como Podzoles fólicos estágnicos, siguiendo los criterios de la WRB 2007, están clasificados así por presentar un horizonte espódico debajo de un horizonte E, bajo en Fe y Al. Estos suelos tienen una espesa capa orgánica en su mayoría de residuos de vegetación, y que es reconocido como el horizonte fólico, y el calificador de estágnico lo recibe por tener evidencias de un patrón de coloración estágnico debido a la reducción superficial por aguas procedentes de las precipitaciones en el subhorizonte superior B (WRB 2007).

En la franja de los 1550 msnm se pueden encontrar otro tipo de vegetación y la densidad de epífitas es menor, hay más horas con sol y las temperaturas media varía cerca de 3 a 4 grados con respecto a los 2500 msnm. Hay 52 especies arbóreas que se encuentran en este sitio, de las que destacan *Cyrilla racemiflora*, *Ticodendron incognitum*, *Pinus chiapensis*, *Podocarpus matudae*, *Zinowiewia maeraeis* y *Liquidambar styraciflua* (Álvarez- Arteaga *et al.* 2008, Rincón 2007) además de latifoliadas, palmas, plantas de ornato, algunas bromelias de gran tamaño y helechos arborescentes (Gallardo 1998). La temperatura en este sitio es de 15.4 °C y varía desde 4.1 a 34.4 °C (Álvarez- Arteaga *et al.* 2008) ver Figura 3.8.2.



Figura 3.8.2 Sitio 2. Fotografía del BBM de la Sierra Norte de Oaxaca a 1550 msnm de la comunidad de Santa Cruz Tepetotutla, se puede observar la presencia de palmas, hay mayor densidad de arbustos

Los suelos para esta altitud se han descrito como Cambisoles fólicos (húmicos, hiperdísticos), donde se tomó en cuenta la capa de mantillo forestal, además de tener un alto contenido de carbono orgánico dentro de los primeros 50 centímetros del suelo, para ambos sitios se encontró que los suelos se caracterizan por tener un pH bajo, y una baja saturación de bases Álvarez-Arteaga *et al.* (2008).

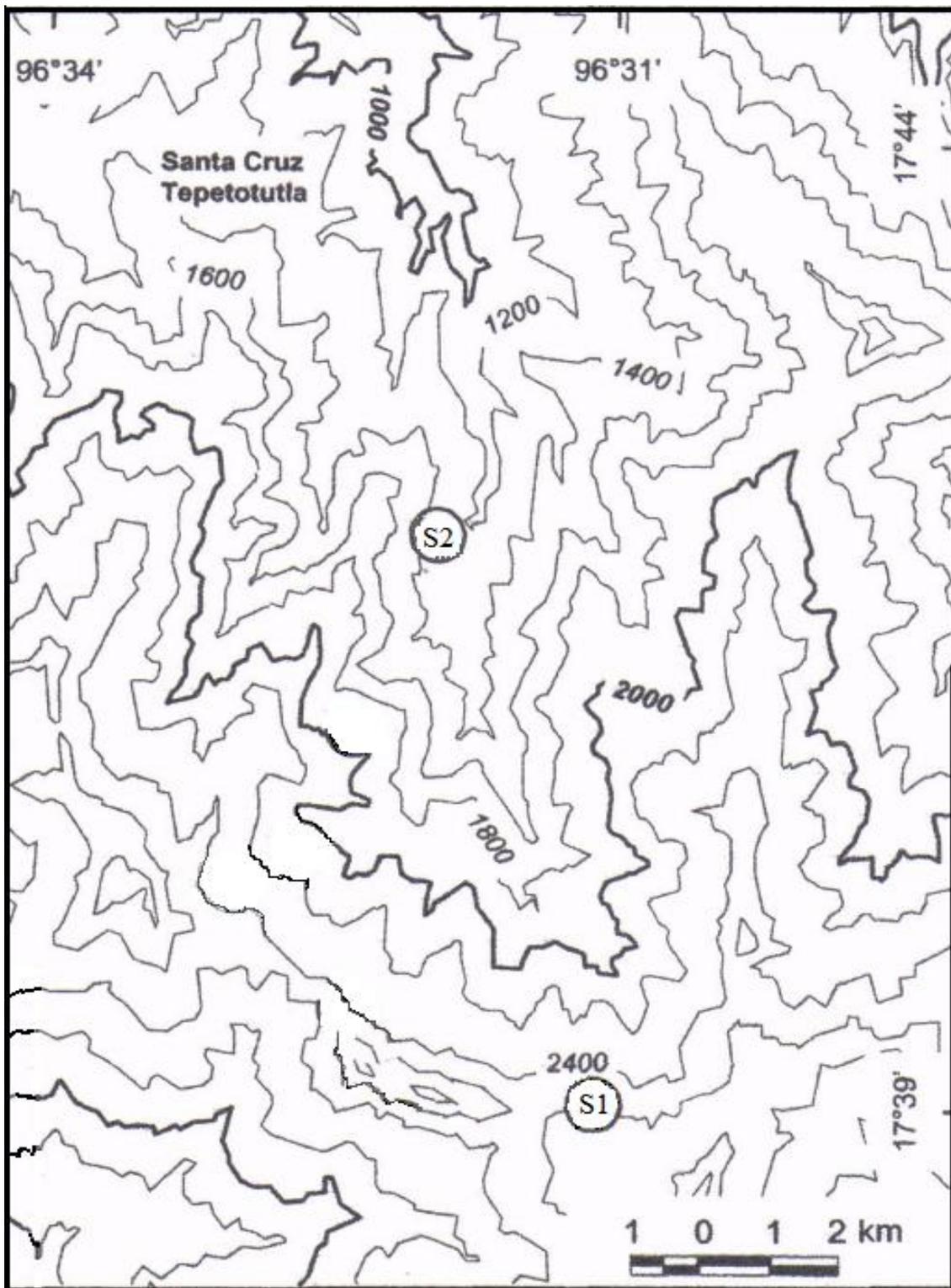


Figura 3.8.3 Gradiente altitudinal de la cuenca del río Perfume, mostrando los sitios de estudio, el sitio 1 (S1) a 2550 msnm y el sitio 2 (S2) a 1550msnm (modificado de Velázquez 1997)

CAPÍTULO IV

MATERIALES Y METODOS

4.1 Establecimiento de los sitios de muestreo

Los sitios de estudio se establecieron en el BMM de la comunidad de Santa Cruz Tepetotutla. Los criterios de selección se basaron en tomar en cuenta: 1) el gradiente altitudinal, del que se eligió el Sitio 1 (S1) que se encuentra a los 2550 msnm y el Sitio 2 (S2) a los 1550 msnm; 2) Exposición de la ladera suroeste y 3) el tipo de comunidades vegetales, donde el S1, pertenece a un BMM alto y el S2 a un BMM bajo (Álvarez-Arteaga *et al.* 2008).

En cada sitio altitudinal, (1550 y 2550 msnm) se eligieron 5 micrositos y en cada uno se delimitó un rectángulo de 25 x 4 m que fueron establecidos en el sentido de las manecillas del reloj (Figura 4.1). En cada uno de los rectángulos se establecieron de manera aleatoria dos cuadrados de 25 x 25 cm donde se realizaron dos perfiles de suelo (cada uno dentro del cuadrante). De cada uno de los perfiles se recabaron las características morfológicas de los horizontes orgánicos y minerales superficiales del suelo; y se tomaron las muestras del mantillo forestal y del suelo. Las muestras que se obtuvieron fueron almacenadas en bolsas de plástico y se transportaron al Laboratorio de Edafología “Nicolás Aguilera” de la Facultad de Ciencias para su análisis.

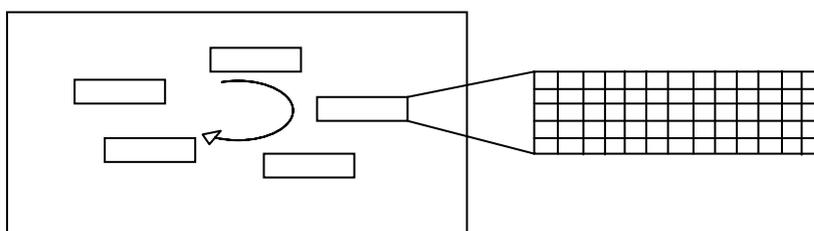


Figura 4.1.1 Establecimiento de los 5 micrositos siguiendo las manecillas del reloj.

Muestreo de mantillo forestal

La toma de muestras del mantillo forestal se realizó colocando primero el cuadrante, con un cuchillo de campo, se cortó el área delimitada, se tomaron las muestras de manera cuidadosa y separando cada capa orgánica y se consideró su espesor (Figura 4.1.2) así como sus características morfológicas (Broll *et al.* 2006). Solo se realizó una colecta de mantillo forestal.



Figura 4.1.2 Muestreo de mantillo forestal en campo, se colocó el cuadrante de 25 x 25 cm, y debajo de éste se tomaron las muestras de los horizontes orgánicos y minerales.

Muestreo de suelo

En cada perfil, se caracterizó y separó el horizonte mineral superficial del suelo para esto último se trató de alterar lo menos posible la muestra, que fue de aproximadamente ½ kg, sacándola con una pala de jardinero y se colocó dentro de un recipiente de plástico con tapa, para determinar el grado de estabilidad del suelo.

4.2 Metodología del laboratorio

Las muestras de mantillo y suelo fueron sometidas a las siguientes pruebas cada una con una repetición: porcentaje de humedad, pH, sodio y potasio solubles y totales para las muestras de los horizontes L y F y para el horizonte mineral superficial se determinó pH, materia orgánica, textura, y por último estabilidad de agregados.

4.2.1 Análisis de mantillo

Análisis físicos

Porcentaje de humedad (van Reeuwijk 2002). La muestra se pesó en una balanza analítica y posteriormente se puso a secar en una estufa (FELISA mod. 293), durante 24 horas para obtener el peso seco y determinar el porcentaje de humedad considerando la siguiente fórmula:

$$\text{Húmedad total (\%)} = [(P_{mh} - P_{ms\ 60^{\circ}\text{C}}) / P_{ms\ 60^{\circ}\text{C}}] * 100$$

Donde:

P_{mh} : peso del mantillo húmedo

$P_{ms60^{\circ}\text{C}}$: peso del mantillo seco a 60°C

Análisis químicos

pH. Método potenciométrico. Se colocó 1g de mantillo y se le añadieron 25 ml de agua o solución de KCl 1N. Las muestras se pusieron a agitar por dos horas, después de este tiempo se valoró el pH con un potenciómetro Corning modelo 7 con electrodo combinado de cristal (Jackson 1982).

Sodio y Potasio Solubles en agua (Wilde *et al.*, 1979). La determinación se llevó a cabo en una suspensión 1:2.5 agua /muestra que se agitó durante dos horas, para esto la mezcla se filtró con un papel Whatman No. 1. En la solución obtenida se determinó sodio y potasio en el flamómetro de llama Corning mod. 400. La concentración se calculó a partir de una curva de calibración de 0, 1.25, 2.5, 3.75 y 5 mg l^{-1} .

Sodio y Potasio Totales en ácido (Wilde *et al.*, 1979). Se tomó 1g de muestra que se quemó en un mechero sobre una capsula de porcelana y después se colocó en una mufla a 450°C , que se disolvió en HCl 1:1. La muestra fue aforada a 100 ml, con agua destilada, y

se analizó en el flamómetro de llama Corning mod. 400. La concentración se calculó a partir de una curva de calibración de 0, 1.25, 2.5, 3.75 y 5 mg l⁻¹.

4.2.2 Análisis de suelo

Las muestras de suelo se secaron a temperatura ambiente y se tamizaron a través de una malla de 2 mm de apertura, y se almacenaron en botes de polietileno

Análisis Químicos

pH. Método potenciométrico: Se tomaron 10 g de suelo a los cuales se les añadieron 25 ml de agua o solución de KCl 1N. Las muestras se agitaron por dos horas, después de este tiempo se determinó el pH con un potenciómetro Corning modelo 7 con electrodo combinado de cristal (Jackson 1982)

Materia Orgánica (MO). Por el método de Walkley y Black (Nelson y Sommers, 1982). Se colocaron en un matraz erlenmeyer de 0.5 a 0.2 g de suelo (dependiendo del color) previamente molidos en un mortero de ágata y tamizados con una malla No.60. A la muestra se le agregó 5 ml de dicromato de potasio (K₂Cr₂O₇) 1N, después se le agregaron 10 ml de ácido sulfúrico (H₂SO₄) concentrado. La muestra se agitó durante un minuto y se dejó reposar 30 min, transcurrido el lapso, se agregaron 100 ml de agua destilada, 5 ml de ácido fosfórico (H₃PO₄) concentrado, y 5 gotas de bariosulfonato de difenilamina. Finalmente, se valoró mediante titulación con sulfato ferroso FeSO₄ 0.5N hasta obtener un vire color verde esmeralda. El contenido de materia orgánica se obtuvo de la siguiente manera:

$$\% \text{ MO} = [(5 - (\text{ml de FeSO}_4 * N \text{ real})) * 0.69] / \text{g de la muestr}$$

Donde:

5 = 5 ml de K₂Cr₂O₇ 1N

ml. de FeSO₄ = ml. de FeSO₄ gastados al titular

N real = normalidad del FeSO₄

El carbono orgánico (CO) se calculo a partir de la siguiente fórmula:

$$\% \text{ CO} = \% \text{ MO} / 1.724$$

Donde:

%MO= porcentaje de MO

1.724 = factor de V. Bemmelen

4.2.3 Análisis de agregados

Textura. Separación de las fracciones granulométricas (Dixon y White 1999). Una muestra de 10 g de suelo, se puso a agitar 24 h en agua destilada, posteriormente se pasó por un tamiz malla No.10, para separar las gravillas. El resto de la muestra se lavó para separar las arenas, el sobrenadante se dejó reposar durante 24 horas y por decantación se obtuvieron los limos mediante centrifugación a 500 rpm durante 5 minutos. El sobrenadante se dejó reposar con aproximadamente 10 gotas de HCl 1:1 para que se decantaran las partículas y por sedimentación se obtuvieron las arcillas, éstas se centrifugaron a 12500 rpm y el botón obtenido se dejó secar en una capsula de porcelana, previamente tarada y seca a 105°C. Finalmente se pesaron las muestras para obtener la relación en porcentaje de cada fracción mineral.

Análisis químicos

Materia Orgánica en las fracciones granulométricas. Método de Walkley y Black, (Nelson y Sommers, 1982). Se colocaron en un matraz erlenmeyer 0.25 g de arenas y de 0.05 a 0.2 g (dependiendo del color) de limos y arcillas, por separado. A la muestra se le agregaron 5ml de dicromato de potasio (K₂Cr₂O₇) 1N, 10 ml de ácido sulfúrico (H₂SO₄) concentrado, se agito durante un minuto y se dejó reposar 30 min, transcurrido el lapso, se agregan 100 ml de agua destilada, 5 ml de ácido fosfórico (H₃PO₄) concentrado, 5 gotas de bariosulfonato de difenilamina (como indicador). Finalmente, se valoró mediante titulación

con sulfato ferroso FeSO_4 0.5N hasta obtener el vire de color verde esmeralda. El contenido de MO se cálculo de la siguiente manera:

$$\% \text{ MO} = [(5 - (\text{ml de } \text{FeSO}_4 * \text{N real}))] * 0.69 / \text{g de la muestra}$$

Donde:

$$5 = 5 \text{ ml. de } \text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \text{ 1N}$$

$$\text{ml. de } \text{FeSO}_4 = \text{ml. de } \text{FeSO}_4 \text{ gastados al titular}$$

$$\text{N real} = \text{normalidad del } \text{FeSO}_4$$

Se puede obtener el CO para cada fracción quedando como sigue:

$$\% \text{ C} = \% \text{ MO} / 1.724$$

Donde:

$$\% \text{ MO} = \text{porcentaje de MO}$$

Estabilidad de agregados en húmedo (Angers y Mehuys 1993). Se colocaron 10 gramos de agregados que se humectaron previamente con un nebulizador, después las muestras se colocaron primero en un tamiz de apertura de 2 mm y después en otro de 250 μm , que se colocó en un rotor horizontal de 1.5 cm que trabaja a 35 ciclos / minuto. Las muestras fueron constantemente humectadas con aproximadamente 250 ml de agua destilada, que se encontraban en un contenedor en la base del rotor, por 10 min. Se obtuvieron 3 tamaños de agregados macroagregados $\geq 2000 \mu\text{m}$, mesoagregados 250-200 μm , microagregados $\leq 250 \mu\text{m}$.

A cada muestra que se obtuvo se le determinó el contenido de arenas, para esto se les agregaron aproximadamente 50 ml peróxido de hidrogeno (H_2O_2) al 30%, para eliminar la MO. Cuando la muestra estuvo seca se tamizó, en una malla de 325 μm , y se obtuvo su peso.

La estabilidad de agregados se calculó de la siguiente manera:

$$\% \text{ AE} = [(\text{pa} - \text{arenas}) / [(\text{pi} / (1 + w) - \text{arenas})]] * 100$$

Donde:

$$\% \text{ AE} = \text{agregados estables}$$

$$\text{pa} = \text{peso de agregados estables en cada malla}$$

p_i = peso inicial de la muestra

w = agua gravimétrica en $g g^{-1}$

arenas = el peso de las arenas presentes en cada muestra

4.3 Análisis de resultados

Se realizó una prueba de correlaciones del momento de Pearson para conocer la relación entre los agregados estables y la proporción de las fracciones del suelo y con el contenido de carbono de cada una de las fracciones. Esto se analizó utilizando el programa Statistica 7; además se realizó la estadística descriptiva con EXCEL.

Los parámetros químicos que se obtuvieron del horizonte orgánico y del horizonte mineral superficial se emplearon para la caracterización del reservorio orgánico de cada piso altitudinal.

CAPÍTULO V

RESULTADOS

Los resultados, arrojaron la caracterización de las formas en las que podemos encontrar la MO en el suelo en la parte orgánica y en la parte mineral.

5.1 Resultados del mantillo

Los horizontes orgánicos en los suelos del BMM de la SNO, presentan en general una secuencia de horizontes OL - OF y OH, en el caso de el horizonte OH fue poco identificable por lo que no se tomó en cuenta el espesor, y para el resto de los horizontes se consideraron los valores promedio de los espesores (Cuadro 5.5.1).

**Cuadro 5.5.1 Características morfológicas de los horizontes orgánicos
(S1 2550 y S2 1550 msnm)**

S1	Horizonte	Profundidad	Morfología
	OL	0-3	Residuos vegetales y animales donde se puede distinguir el origen de los materiales, presenta baja degradación y con gran humedad. En 4 de 5 sitios, se encontraron restos de micelios de hongos. Valor máximo del horizonte 6.5
	OF	3-11	Residuos vegetales poco reconocibles más degradados que el horizonte anterior, con cambios en su coloración, se alcanzan a distinguir algunos restos pequeños de material leñoso. Valor máximo del horizonte 25.5 cm
	OH	n.d.	No se pudo distinguir, de menos de 1 cm de espesor comenzaba a mezclarse con el horizonte mineral
S2	OL	0-3	Residuos vegetales y animales con bajo grado de descomposición, se puede distinguir el origen de sus materiales, presenta abundantes plantas enraizadas. Valor máximo del horizonte 19 cm.
	OF	3-12	Residuos vegetales más degradados que el horizonte anterior, presencia de raíces finas y menor cantidad de raíces gruesas. Valor máximo del horizonte 8 cm.
	OH	n.d.	Este horizonte se encuentra mezclado con el horizonte mineral, mide menos de 0.5 cm.

En los horizontes OL, para ambos sitios se los que presentó mayor humedad, sobre todo para el horizonte OL del S1, y los horizontes OF, de ambos sitios, presentan valores menores que los del horizonte OL, pero con valores similares en la humedad de cerca del 7.5%. El mantillo fue ácido para ambos en sitios, tanto en agua como en KCl. En el S1, los horizontes OL y OF presentaron valores ácidos para el pH en agua y se obtuvieron valores muy ácidos para el pH potencial (KCl) en el horizonte OF, donde el valor es de 2.5 y en el horizonte OL es de 3.6, para los realizados en agua, se obtuvieron valores de 4.5 para el horizonte OL y de 4.1 para el OF. Para el S2, se obtuvieron valores aun más ácidos que para el S1, sobre todo para el horizonte OF, que en agua fue de 3.5 y en KCl, de 1.9, para el horizonte OL fue de 3.6 en agua y de 2.6 en KCl (ver tabla 5.1).

En el caso de los cationes el sodio soluble presenta valores homogéneos que no sobrepasan los $0.12 \text{ cmol kg}^{-1}$, para el S1, el horizonte OF presenta mayor cantidad que el OL, y la tendencia para el piso 2, es contraria ya que el OL presenta mayor cantidad que el OF.

Para el sodio total, se observa una mayor variabilidad entre los horizontes orgánicos y entre los sitios, el sitio 2 presenta mayor cantidad en el horizonte OL y en el OF en comparación con el S1. Para el potasio soluble en el S1 se presenta mayor variabilidad entre sus horizontes siendo el OL el que presenta mayor cantidad que el OF, en el S2, los valores entre los horizontes permaneces estables. Para el potasio total, se encuentra de igual manera mayor cantidad en el S1, pero ahora en el horizonte OF, y para el sitio 2 se pueden observar los valores más homogéneos entre ambos horizontes (ver tabla 5.5.1).

Tabla 5.5.1 Resultados obtenidos de las muestras de los horizontes OL y OF para ambos pisos. Se muestra la desviación estándar

		Humedad		pH	K sol	K tot	Na sol	Na tot
		%	agua	KCl	c mol·kg ⁻¹			
S1	OL	8.6± 1.7	4.5± 0.25	3.6 ± 0.39	1.08 ± 0.20	7.43 ± 7.61	0.11 ± 0.01	0.49 ± 0.31
	OF	7.7± 4.1	4.1± 0.29	2.5 ± 0.38	0.69 ± 0.27	26.82 ± 11.79	0.12± 0.03	0.27 ± 0.15
S2	OL	7.7± 2.4	3.6± 0.3	2.6 ± 0.38	0.71 ± 0.12	12.03 ± 8.90	0.12 ± 0.01	0.57 ± 0.23
	OF	7.6± 3.8	3. ± 0.32	1.9 ± 0.5	0.68 ± 0.97	16.11 ± 10.06	0.11 ± 0.01	0.30 ± 0.19
					Σ	62.39		1.71

A continuación se muestran las gráficas de los resultados obtenidos a las muestras de mantillo y de suelo.

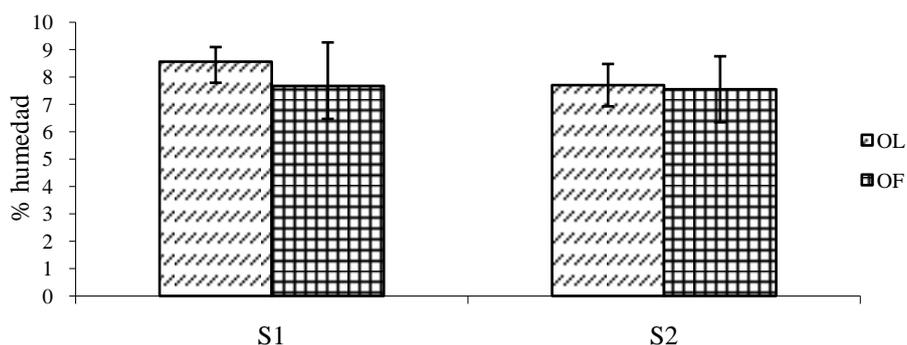


Figura 5.1.1 Humedad de los horizontes orgánicos OL y OF de ambos sitios S1 2550 y S2 1550 msnm

El mantillo para el S1 tuvo un porcentaje de humedad en el horizonte OL de 8.6% y en el horizonte OF de 7.7%. En tanto que el S2, en el horizonte OL el porcentaje fue de 7.7% y para el OF de 7.6% (Figura 5.1.1).

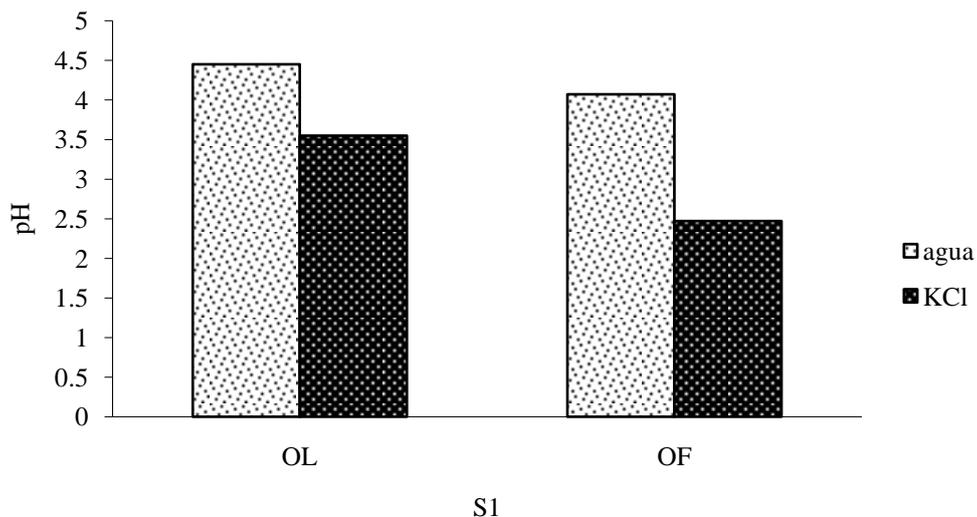


Figura 5.1.2 pH de los horizontes orgánicos del S1, en agua y en KCl

En la figura 5.1.2 se observan los resultados del pH para el sitio 1, de manera general para ambos horizontes se encuentran valores ácidos, los valores obtenidos con agua son menos ácidos que los que se obtuvieron con el KCl, y el horizonte OL es menos ácido que el horizonte OF, donde se obtuvo el valor más ácido de 2.5, la diferencia de unidades entre ambos tratamientos es de 1.5 en promedio para ambos horizontes.

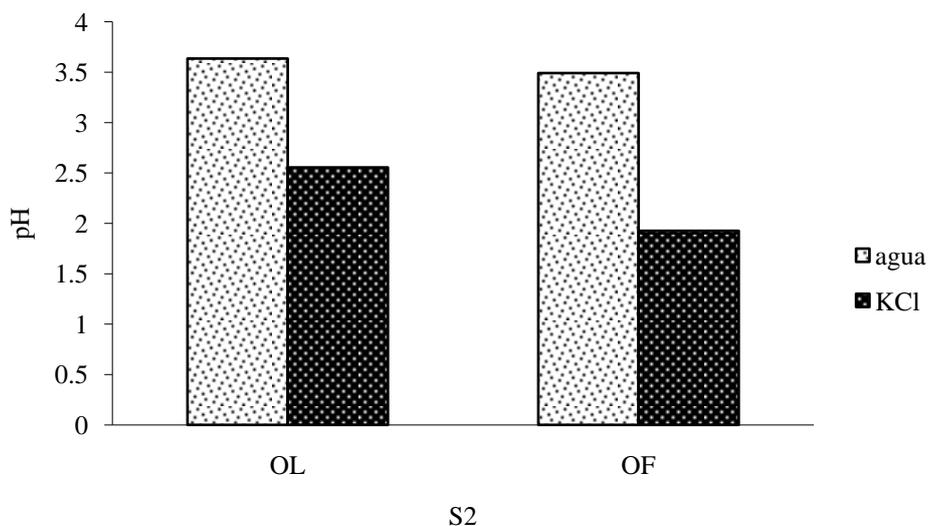


Figura 5.1.3 pH de los horizontes orgánicos del S2, en agua y en KCl

La figura 5.1.3 muestra los valores de pH, obtenidos para el S2, donde se conserva la misma tendencia de acidez (valores por debajo de 3.5) que en el S1, observamos que la acidez tiene cerca de dos unidades de diferencia entre ambos tratamientos y que los horizontes OF siguen siendo más ácidos que los horizontes OL.

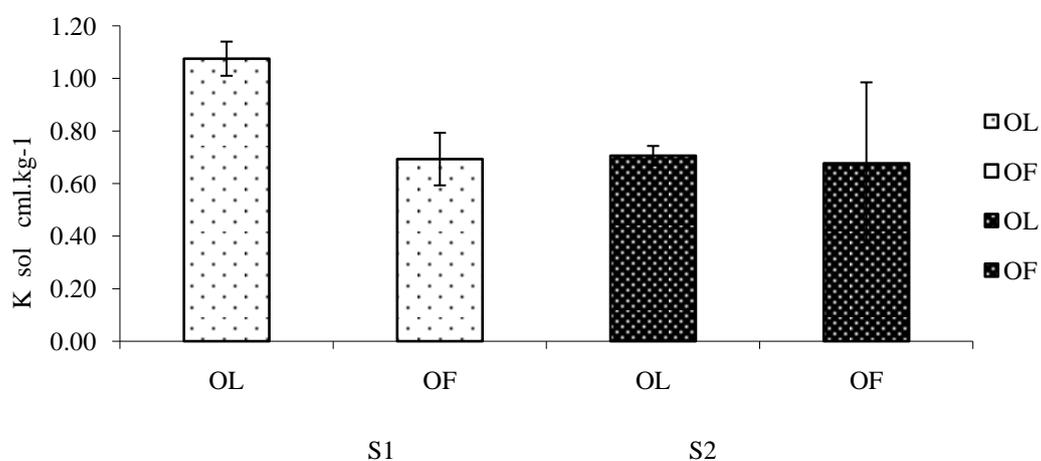
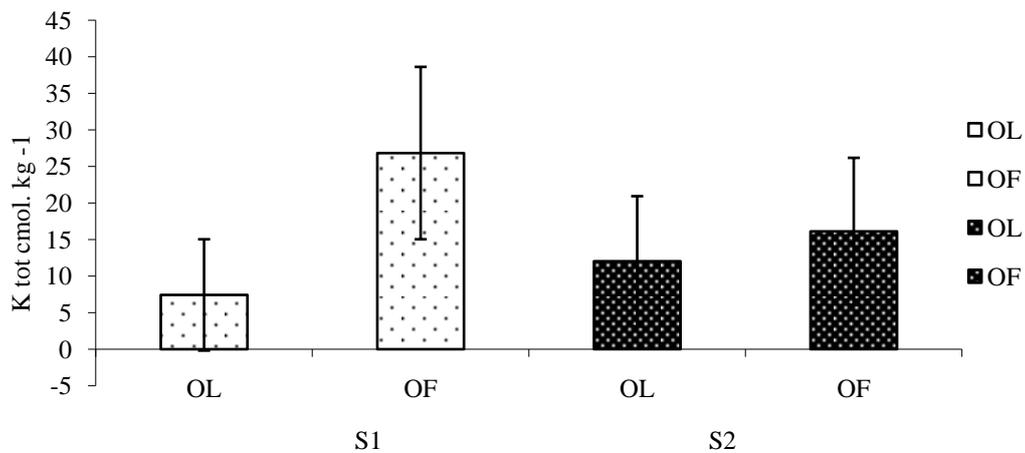


Figura 5.1.4 Potasio soluble de los horizontes orgánicos del S1y S2

La figura 5.1.4 muestra el comportamiento del potasio soluble de ambos sitios, donde el sitio 1 presenta más potasio con $1.08 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$, en el horizonte OL y el horizonte OF tiene $0.69 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$. En el S2 el potasio se vuelve más estable siendo de $0.71 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$, para el OL y de $0.68 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$, para el OF.



5.1.5 Potasio total para los horizontes orgánicos del S1 y del S2

El potasio total (figura 5.1.5) se encuentra en mayor cantidad en el sitio 1, y para el horizonte OF con $26.82 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$, el horizonte OL presenta $7.43 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$, para el S2 el horizonte OF presenta también la mayor cantidad de potasio total con $16.11 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ y el horizonte OL tiene $12.03 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$.

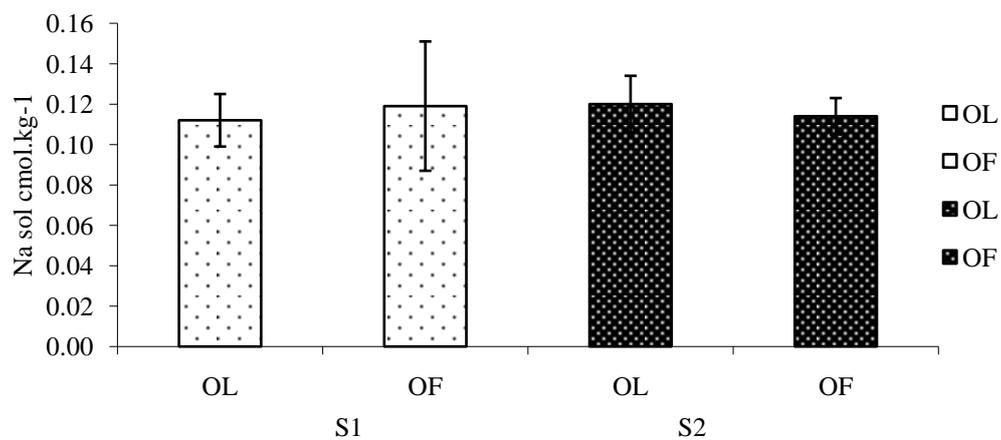


Figura 5.1.6 Sodio soluble de los horizontes OL - OF del S1 y S2 ambos sitios

En la gráfica 5.1.6 se observa que el sodio soluble se presenta de manera homogénea pues no se observan grandes diferencias, para el S1 el horizonte OL tiene $0.11 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$, y el horizonte OF tiene $0.12 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$. Para el S2 el horizonte OL tiene $0.12 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ y el horizonte OF presenta $0.11 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$.

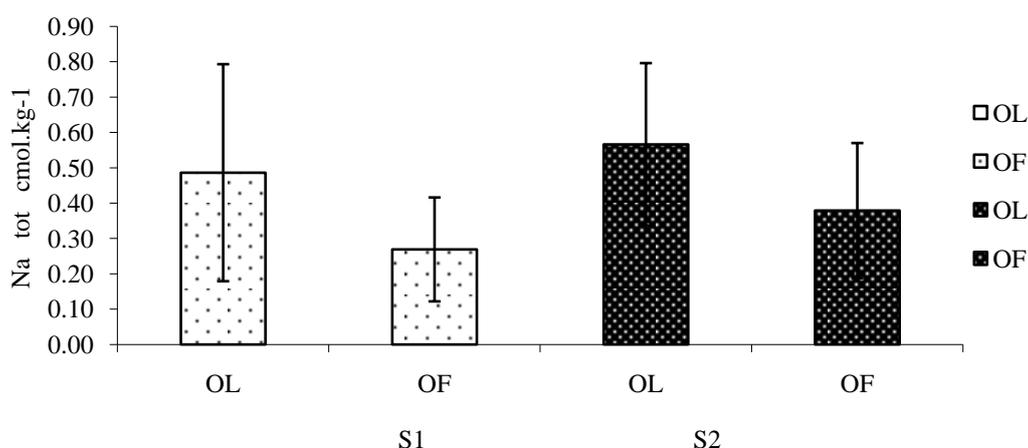


Figura 5.1.7 Sodio total de los horizontes OL y OF del S1 y del S2

Para el sodio total se observa una mayor variabilidad en los resultados (ver Figura 5.1.7), el S1 en el horizonte OL tiene $0.49 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$, y en el OF $0.27 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$. En el S2 el horizonte OL presenta la mayor cantidad de este catión de ambos sitios con $0.57 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$, y el horizonte OF con $0.38 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$.

5.2 Resultados de los agregados

Las características morfológicas que se obtuvieron en campo para los horizontes que subyacen a la capa orgánica se resumen en el cuadro 5.5.2, para ambos sitios se encontró un horizonte Ah, con estructura granular y subangular en bloques, en ambos sitios se encontraron raíces finas.

Cuadro. 5.5.2 Características morfológicas de los horizontes minerales de ambos sitios (S1 2550 y S2 1550 msnm)

Horizonte	Morfología
S1 Ah	Estructura granular, con abundantes raíces finas
S2 Ah	Estructura granular, con raíces de tamaño fino y mediano

En cuanto a las características químicas de los horizontes minerales del suelo, se obtuvo que para ambos sitios se encontró un pH ácido, y se puede ver mayor variabilidad entre los resultados obtenidos sobre todo para el S1 ya que el pH potencial difiere en más de una unidad con respecto al obtenido en agua, el S2 también mostro valores ácidos pero que se mantienen de manera homogénea entre los obtenidos para agua y KCl, para el CO tenemos que es en el S2 donde se presenta mayor cantidad con respecto al S1, en relación a la separación de fracciones la cantidad de arenas es baja para ambos sitios y lo es aún mayor en el S1, para la fracción de limos +arcillas que fue la fracción de mayor porcentaje se obtuvo mayor cantidad para el S2, y para el CO presente en las fracciones de limos+arcillas éste es mayor en el S1, pero en el contenido de CO de las arenas es mayor en el S2 (Ver tabla 5.5.2).

Tabla 5.5.2 Resultados obtenidos de las muestras de suelo para el S1 (2550 msnm) y S2 (1550 msnm). Se muestra la desviación estándar

	pH		COT g ·kg ⁻¹	Separación de fracciones (%)		CO en fracciones (%)	
	agua	KCl		arenas	lim + arc	arenas	lim + arc
S1	3.2 ± 0.14	2.5 ± 0.25	12.64 ± 7.33	31.20 ± 1.61	68.80 ± 1.12	0.49 ± 0.21	28.99 ± 6.22
S2	3.3 ± 0.46	3.2 ± 0.43	26.10 ± 21.72	26.26 ± 0.47	73.74 ± 0.72	2.92 ± 0.37	18.42 ± 2.18

A continuación se detallan los resultados y las graficas que se obtuvieron para las muestras de suelo.

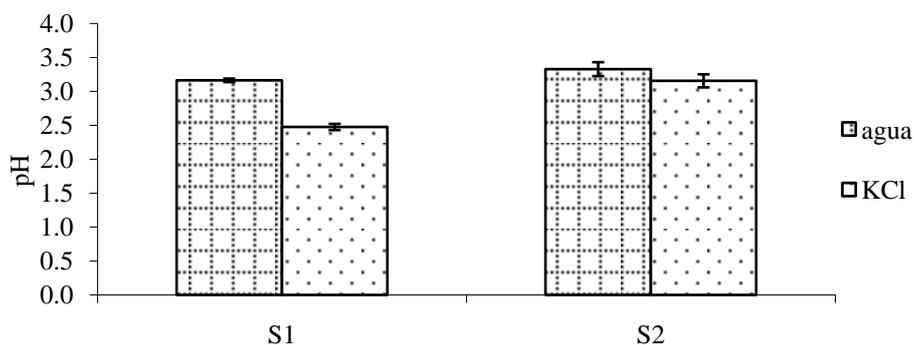
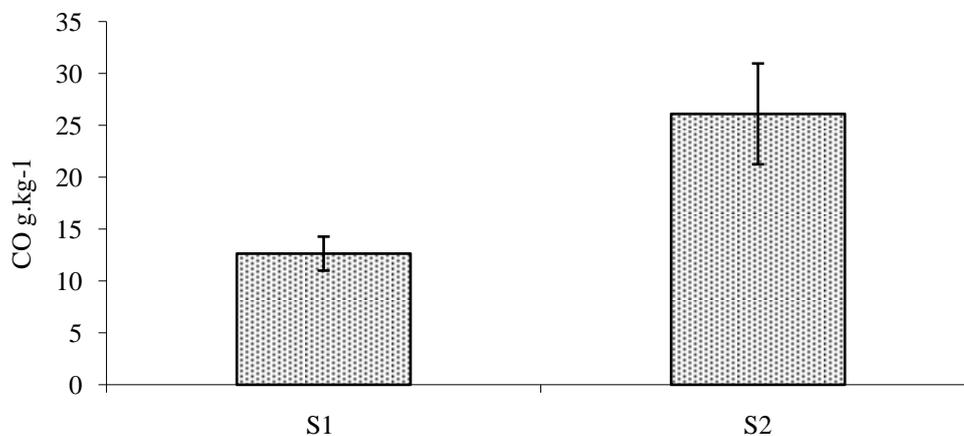


Figura 5.2.1 pH del suelo de ambos sitios

En la figura 5.2.1, observamos que el pH en agua es menos ácido para ambos pisos, y el pH potencial presenta valores más ácidos, y la diferencia es mayor para el S1, donde el pH potencial difiere en cerca de casi una unidad y es de 2.47 y en agua es de 3.16, y en el S2, la tendencia de acidez se conserva de forma menos drástica pues el pH en agua es de 3.32 y en KCl es de 3.155.



5.2.2 Carbono orgánico para el S1y S2

En la figura 5.2.2 se observa que el S2 presenta una mayor cantidad de carbono orgánico con 26.10 g·kg⁻¹, y el S1 tiene 12.64 g·kg⁻¹.

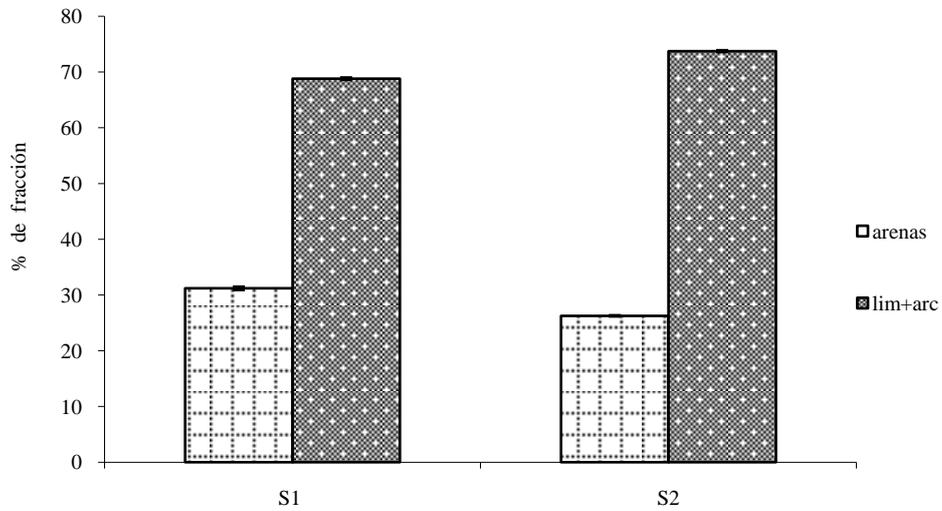


Figura 5.2.3 separación de fracciones para el S1 y S2

En la figura 5.2.3 observamos que para ambos sitios la fracción dominante es la de limos +arcillas, y el sitio que presenta mayor porcentaje es el S2 con 73.74 %, y el S1 con 68.80 %, la fracción que se presenta en menor porcentaje es la de las arenas con 31.20 % para el S2 con 26.26 %.

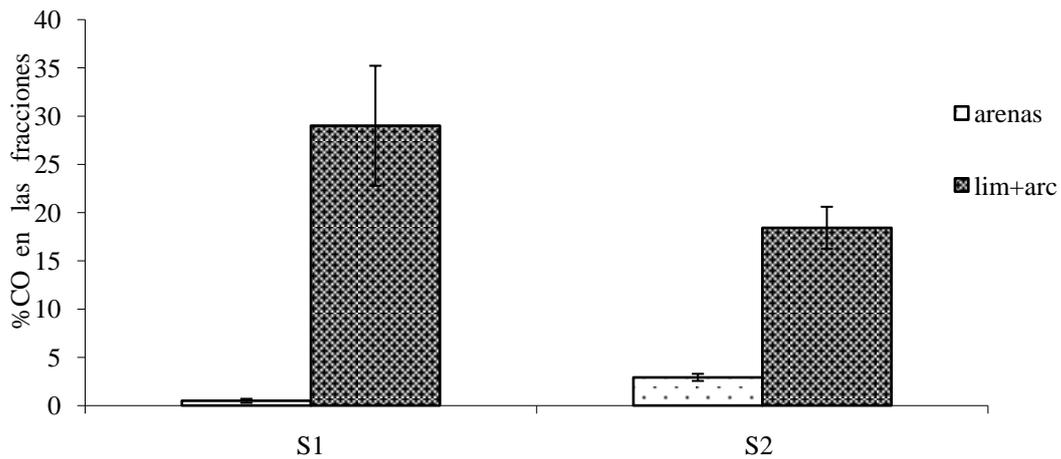
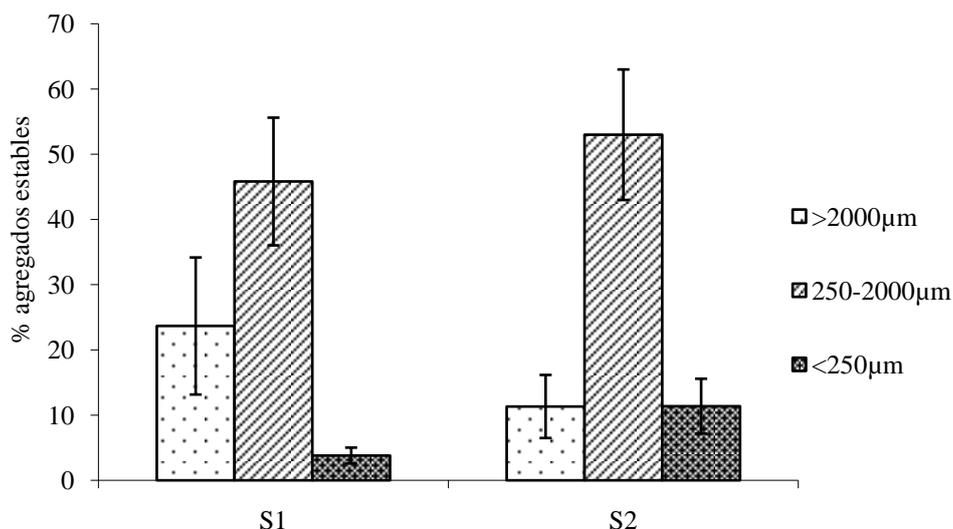


Figura 5.2.4 carbono orgánico en las fracciones del S1 y S2

En la figura 5.2.4. se muestra el porcentaje de carbono orgánico (CO) obtenido para cada una de las fracciones de la grafica anterior (Fig. 5.2.3) para el S1, la fracción dominante de limos+ arcilla tiene un porcentaje de carbono 28.99 y de la fracción de las arenas de 0.49 %. Para el S2, la fracción de los limos+arcillas tiene 18.42 % CO y las arenas de 2.92 %.



5.2.5 Porcentaje de macroagregados(> 2000 µm), mesoagregados (250-2000 µm) y microagregados (<250 µm) estables para el S1 y el S2

En la figura 5.2.5 se muestra el porcentaje de agregados estables para el S1 y S2, para ambos sitios, el tamaño de agregados estables que predominan fueron los mesoagregados (de 250-2000µm), para el S1, tenemos que los mesoagregados tuvieron un 45.81% de agregados estables, siguiéndole los macroagregados (>2000µm) con un 23.66%, y los microagregados(<250µm) en menor proporción con un 3.80%. Para el sitio 2, los agregados estables dominantes fueron los mesoagregados, con un 52.98%, después le siguen los macro y microagregados con un 11.32 y 11.37 % respectivamente.

5.3 Correlaciones

En relación a las correlaciones que se realizaron entre las diferentes variables, tenemos que en el S1 se presentó solamente una correlación significativa entre la fracción de los limos+arcillas y los macroagregados ($> 2000\mu\text{m}$) y el CO de las arenas con los mesoagregados ($250\text{-}2000\mu\text{m}$); en tanto que para el S2 la correlación se estableció entre los limos+arcillas y los mesoagregados, y el CO de limos+arcillas con los microagregados ($<250\mu\text{m}$), además del pH con los microagregados (ver tabla 5.3.1).

Tabla 5.3.1 Correlación del momento de Pearson entre los tamaños de agregados, las fracciones de arenas y limos + arcillas y el carbono asociado a cada una de ellas.

Las correlaciones más altas se muestran en negritas ($P \leq .05$)

S1	$>2000\mu\text{m}$ macroagregados	$250\text{-}2000\mu\text{m}$ mesoagregados	$< 250\mu\text{m}$ Microagregados
arenas	-0.76	-0.02	-0.22
lim+arc	0.86	0.28	-0.1
CO arenas	0.16	-0.81	0.66
COlim+arc	0.68	0.03	0.02
pH agua	-0.66	-0.57	0.44
pH KCl	0-06	-0.01	-0.56
S2			
arenas	-0.61	0.63	0.58
lim+arc	-0.64	0.71	0.38
COarenas	-0.01	0.12	-0.38
COlim+arc	0.54	-0.52	-0.75
pH agua	-0.51	0.44	0.32
pH KCl	-0.74	0.70	0.74

CAPÍTULO VI

DISCUSIÓN

6.1 Estabilidad del carbono orgánico en el mantillo

Las condiciones edáficas del BMM, favorecen procesos pedogenéticos de acumulación de humus bruto, intemperismo *in situ*, la podzolización, y la reducción de hierro debido a las condiciones de hidromorfismo (Álvarez-Arteaga *et al.* 2008), que son característicos de ambientes templados, húmedos y boreales (WRB 2007). En el caso de los sitios analizados se evidenció la acumulación del humus poco transformado, que forma un mantillo forestal, que de acuerdo a diferencias morfológicas permiten identificar el horizonte orgánico, como humus tipo mor. Este se distingue por la presencia de los subhorizontes tipo OL (L), OF (F) y OH, que sobreyacen al horizonte Ah, y que morfológicamente se reconocen por presentar un contenido de fibras orgánicas del 10 al 70% de acuerdo a Broll (2006), estos horizontes deben ser no masivos y no compactos, sin embargo la acidez que presentaron estos horizontes nos llevan a esta nomenclatura (Ponge 2003), este horizonte fue considerado por Álvarez-Arteaga (2008) como horizonte fólico. La presencia de este tipo de horizontes indica una descomposición gradual de los residuos orgánicos, lo que podría indicar una baja actividad biológica, asociada a una baja diversidad de descomponedores (Gobat *et al.* 2003). En los BMM se ha encontrado que la degradación de los residuos se encuentra asociada a la actividad de los hongos que en este caso son los principales degradadores de la hojarasca (Ekschmitt *et al.* 2008, Mungai y Motavilli 2006, Jenn-Shing y Chiu 2000) y que coincide con los resultados encontrados en el campo sobretodo para el sitio 1, donde se evidenció la presencia de micelios en el horizonte orgánico OF.

La presencia de diferentes espesores de los horizontes muestra la dinámica de descomposición e incorporación de los residuos orgánicos. El sitio presentó diferentes grosores en el mantillo donde la presencia de los horizontes orgánicos más gruesos se estableció en el sitio 1, que se encuentra a una altitud de 2550 msnm. Esto puede explicarse por la dinámica de la descomposición del mantillo, ya que se ha visto que en estos ambientes la tasa de descomposición es lenta (Edwards y Grubb 1972, Tanner *et al.* 1998, Prescott 2005). En el S2 a 1550 msnm, se presentó un menor espesor del mantillo, que puede asociarse a una mayor descomposición debido a cambios en las condiciones de temperatura y humedad, ya que el sitio 2 presenta un ligero aumento en la temperatura de casi 4°C (Stadmüller 1987, Hobbie 1996).

Un rasgo importante de destacar es que hay diferencias en la dinámica del mantillo en el BMM relacionadas con la altitud, esto puede estar representado por los espesores de los horizontes orgánicos ya que se pudo observar que en la zona de mayor altitud se establece el mayor espesor del horizonte OF y menor espesor del OL, que podría evidenciar los procesos de descomposición, por lo que se considera que la incorporación del OL hacia el OF, es de manera gradual y lenta. En cambio para la zona de menor altitud, (S2) 1550 msnm, se observó lo contrario, el horizonte OF presentó el menor espesor y el OL tuvo un mayor espesor, con lo anterior se puede evidenciar que la dinámica del mantillo está dada por el horizonte de fermentación (OF), ya que está siendo transformado más rápidamente por aumento en la tasas de descomposición, en tanto que el incremento en el espesor del horizonte OL, en este sitio, puede atribuirse a la entrada de hojarasca, relacionada con la alta abundancia de especies (Rincón 2007). García-Calderón *et al.* (2008), mencionan que cerca del 71 % de CO está contenido en las capas orgánicas OL y OF, con lo que se refuerza su función como almacén de carbono en este bosque.

La descomposición de los residuos orgánicos se encuentra asociada a su calidad (Coûteaux 1995), en este caso, las condiciones del mantillo están dominadas por reacciones ácidas, sobre todo considerando el pH potencial en el horizonte OF (Tabla 5.1). Es importante mencionar que los valores de pH obtenidos para los horizontes OL y OF son fuertemente ácidos de acuerdo a Siebe *et al.* (1996). La reacción menos ácida se obtuvo para el S1, y la más ácida para el S2, resultados que coinciden con los obtenidos por Álvarez-Arteaga *et al.* (2008), y valores de entre 2 y 4 que en general se han encontrado para este tipo de ecosistemas, como menciona Schawe *et al.* (2007). La acidez que se presenta en los horizontes orgánicos es debida a la descomposición del litter, la exudación de las raíces y a los hongos quienes secretan ácidos orgánicos (Ponge 2003) y a la poca aireación (Porta *et al.* 1999), de manera importante podemos observar que en el sitio 2 tendría una tendencia de mayor acidez ya que su potencial de acidez es el más bajo. Este proceso de acidificación puede explicarse por la presencia de compuestos ácidos como serían los metabolitos secundarios entre ellos los compuestos polifenólicos, los cuales disminuyen la tasa de descomposición (Hättenschwiler 2005, Álvarez-Sánchez y Harmon, 2003).

La calidad de la hojarasca se relaciona con los cationes, en este sentido los mantillos con una composición de bases alta tienden a una mayor descomposición, los mantillos presentes en estas zonas templadas frías tienen una tendencia de bajo contenido de bases. El mantillo de los sitios de estudio del BMM presenta contenidos en la suma de sus cationes con valores de $62.387 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ de K y de $1.7 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ de Na, por lo que se esperaría la lenta tasa de descomposición del mantillo. Dentro del sitio de estudio, la tendencia es la composición diferente con respecto al rango altitudinal ya que para el S1, en el horizonte OF se estableció el mayor contenido de K total y menor de K soluble. En tanto que el S2 presentó un menor contenido de K, siendo el horizonte OF el de mayor concentración del K total y el OL el K soluble. En tanto que la tendencia del Na es contraria ya que la mayor

cantidad de Na se estableció en el S2 y la tendencia podría ser que éste se acumule en el horizonte OL, de esta misma manera se presentó en el sitio 1, aunque el contenido total de sodio es menor que en el S2, podemos mencionar también que el K es un elemento abundante en la hojarasca y fácil de lixiviar puede estar acumulándose de manera parcial en el horizonte OF lo que sucede para ambos sitios, en tanto que para el Na podemos inferir que como microelemento podría no estar de manera abundante en el mantillo y aunado a las tasas de lavado, el Na podría estar saliendo más rápido, estos resultados coinciden con los obtenidos por van Wesemael (1993), quien obtuvo la misma tendencia para ambos elementos.

6.2 Estabilidad del carbono en suelos

Otro almacén importante de carbono del BMM es el suelo pues es donde se puede estar acumulando de manera más factible el carbono, una de los compartimentos en donde este carbono puede quedar atrapado es en los agregados, que dan lugar a la estructuración en el suelo. En el sitio de estudio, el suelo presentó estructuración de tipo granular y subangular en bloques, y se observaron abundantes raíces que en general demuestran una buena agregación para ambos sitios, pues la mayor cantidad de raíces es favorecida cuando la consistencia y estructura del suelo son favorables (Nieder y Benbi 2008).

Los agregados actúan a su vez como protectores de la MOS de la descomposición acelerada (Martínez *et al.* 2009) sobre todo en las fracciones pequeñas, consideradas como meso y microagregados. Los resultados de agregación en el sitio mostraron que para el S2, se obtuvo la mayor cantidad de agregados estables, en el tamaño de mesoagregados y microagregados, con lo anterior podemos tener un indicador del C estable que concuerda con lo reportado por Jiménez *et al.* (2008) donde la mayor estabilidad del carbono se da en agregados < de 250µm, catalogados como meso y microagregados, de acuerdo a diversos

autores como Six *et al.* (2002), Martínez *et al.* (2009), Evans *et al.* (2001), el porcentaje de agregados estables, tiene una estrecha relación con la estabilidad de la MO a largo plazo, pues es dentro de los agregados donde se acentúa la humificación de la Materia Orgánica Particulada (MOP) (Buyanovski *et al.* 1994), y junto con los exudados de las raíces y la actividad de la edafofauna se favorecerá la formación de los macroagregados (Six *et al.* 2002, Hillel 1998). Autores como (Six *et al.* 2002) ha observado que la MO permanecerá a largo plazo dentro del suelo en los microagregados, pues es en estos donde se presentan pequeñas fracciones coloidales que es donde el carbono orgánico no está disponible para la edafofauna, pues se protege del desdoblamiento de los procesos enzimáticos de los microorganismos. Además este carbono formará complejos órgano-minerales estables y difíciles de degradar con lo que se evita la mineralización de la MO.

Para el S1, la estabilidad del Carbono se establece en los mesoagregados, sin embargo en este sitio los macroagregados presentan un mayor porcentaje de estabilidad que los microagregados lo que puede estar relacionado con su mismo proceso de formación pues al no haber tanto COT las fracciones del suelo pueden no estar siguiendo la ruta de formación de agregados hacia las formas más estables que son la de los meso y microagregados, puede ser que la MOP, esté siendo incorporada de manera rápida de los horizontes orgánicos superiores, lo que hace mayor la formación de macroagregados y no de meso y micro. Para ambos sitios el tamaño de mesoagregados es el más estable ya que es el que presenta mayor porcentaje, por lo que se puede inferir que el carbono en este bosque presenta dos tendencias, en el S1 es de corto a mediano plazo, pues hay mas porcentaje de agregados estables de tamaño meso 45.81% (250-2500 μm) y macro 23.66% ($\geq 2000 \mu\text{m}$); para el S2 se encuentra protegido a mediano y largo plazo, ya que para este sitio, el porcentaje de mesoagregados fue de 52.98%, y después los microagregados ($\leq 250 \mu\text{m}$) con 11.37%. Es importante considerar a los macroagregados estables que al continuar con su

ciclo particularmente en el S1, pueden seguir contribuyendo a la formación de meso y microagregados protegiendo al carbono o dejando el C libre para su mineralización (Six *et al.* 2002). Aunado a lo anterior los resultados de CO obtenidos para ambos sitios, podemos observar que el S1 se obtuvo una menor cantidad de CO, y el S2 una mayor cantidad de CO, resultados que coinciden con los obtenidos por Álvarez-Arteaga *et al.* (2008) al relacionar lo anterior con las tasas de humificación y las condiciones climáticas el S2 puede evidenciar una mayor humificación de la MO por lo que se presenta una mayor cantidad de carbono que ha sido incorporado en los horizontes minerales, evidenciando las condiciones climáticas y de la intervención de la edafofauna.

Es conocido que muchas de las reacciones del suelo están dominadas por el tamaño de las fracciones (Golchin *et al.* 1995), por lo que al realizar la separación de fracciones de ambos sitios se obtuvieron resultados similares en los contenidos de limos+arcillas, siendo ligeramente más alto para el S2, y el contenido de arenas es ligeramente mayor para el S1, aunque hay que considerar que las muestras no fueron sometidas a procedimientos para separar de manera selectiva los limos de las arcillas. Teniendo en cuenta que la fracción dominante es la de limos+arcillas es esta fracción donde se encuentra la mayor cantidad de carbono ligado formando complejos órgano-minerales. Con esto se refuerza la estabilidad del carbono en las fracciones pequeñas (meso y microagregados), pues autores como Jiménez *et al.* (2008), Matus y Maire (2000) y Golchin *et al.* (1995), consideran que en la fracción de limos+arcillas se asocia la mayor cantidad de carbono.

Un factor importante de considerar es la reacción del suelo que es ácida, siguiendo con esto la tendencia de las capas superiores (Bruijnzeel y Veneklaas 1994), estos resultados son similares a los que se obtuvieron con Stadmüller (1987), Wilcke *et al.* (2002) y Bautista-Cruz y Castillo (2003), para suelos del mismo ecosistema, en los sitios de estudio se

obtuvieron reacciones ácidas, sobre todo para el sitio 1, en concordancia con Álvarez-Arteaga *et al.* 2008. La reacción ácida, se asocia principalmente a la desaturación de bases en los horizontes minerales lo que se reporta para la mayoría de los suelos de los bosques mesófilos, aunado a la solución de las capas orgánicas superiores del perfil. Además de mencionar que la acidez extrema es típica para los suelos donde se establecen los BMM (Stadmüller 1987) formados en rocas pobres en bases (Álvarez-Arteaga *et al.* 2008), en condiciones climáticas, de alta humedad con lluvias casi todo el año, por lo que los ácidos orgánicos que se forman en la solución del suelo durante la descomposición de la MO, la exudación de las raíces y a la misma dinámica de los ciclos biogeoquímicos del BMM, incrementan el potencial de acidificación de estos suelos. Autores como Schawe *et al.* (2007), Wilcke *et al.* (2002) y Jenn-Shing y Chiu (2000), encontraron resultados similares con respecto a la acidez, en bosques ecuatorianos que presentan una relación del incremento de la acidez con la altitud, para los sitios de estudio aunque se encuentran pH ácidos, lo anterior corresponde pues es el sitio 2 a 1550 msnm se encuentran los valores de pH ligeramente más altos que para el S1.

En relación a las correlaciones que se obtuvieron del S1 para los macroagregados con las arenas obtuvieron una correlación negativa (-0.76), y los limos+arcillas obtuvieron una correlación de 0.86 esto sostiene lo que algunos autores mencionan acerca de que los tamaños de partícula pequeños pueden estar asociados a la mayor formación de agregados, para los mesoagregados se obtuvo una correlación negativa con el CO de las arenas, con lo que observamos que el C, está asociado a los agregados y puede ser un carbono estable a largo plazo, pues está dentro de la fracción media de los agregados por último con los microagregados no se obtuvo relación entre las fracciones, el carbono de las fracciones o el pH.

Para el S2, los macroagregados tuvieron una correlación negativa con los limos y las arcillas de -0.64 y el pH, con KCl de -0.74; para los mesoagregados se obtuvo una correlación de 0.63 con las arenas, de 0.71 para los limos+arcillas y de 0.70 con el pH en KCl; y para los microagregados con el CO de limos+arcillas y con el pH en KCl de 0.74.

Con todo lo anterior podemos decir que el BMM, es un ecosistema en el que la hojarasca, y la vegetación como tal, están protegiendo al COS, lo que permite que éste carbono se esté integrando hacia las partes más profundas del suelo hasta almacenarse en agregados de tamaño pequeño en forma estable. Lo anterior también se refuerza los trabajos realizados por García-Calderón *et al.* (2008), ya que menciona que los suelos de este ecosistema son extremadamente ricos en CO con rangos de 228 a 756 t·año con lo que se fortalece la idea de que los bosques mesofilos de montaña son uno de los ecosistemas con mayor cantidad de reservas de CO en el suelo.

CONCLUSIONES

-El carbono del mantillo en el BMM se estabiliza en forma de un humus tipo mor.

-La presencia de horizontes orgánicos OL y OF, evidencian la baja transformación de los residuos por lo que el Carbono se considera estable y se infiere una tasa de actividad biológica baja.

Los residuos orgánicos fueron ácidos y con un bajo contenido de bases, lo que propicia una baja descomposición y por lo tanto la estabilidad del carbono

-En los suelos del BMM se encontraron horizontes de acumulación de MO (Ah) que evidencian los procesos edafogenéticos de humificación.

-La principal forma de estructuración del suelo para el horizonte Ah, fue la granular

-El mayor porcentaje de agregados estables se encontró para los mesoagregados, es ahí donde el carbono del suelo de este bosque se estabiliza, mediante la formación de agregados de tamaño pequeños como son los meso y microagregados.

-El carbono encontrado en las fracciones se estabiliza a largo plazo por encontrarse en los tamaños de fracciones pequeñas (limos+ arcillas) y por ende en los tamaños pequeños de agregados.

BIBLIOGRAFÍA

- Alfaro S.G. 2004. Suelos. En Biodiversidad de Oaxaca (Eds. García-Mendoza A.J., Ordoñez M.J., Briones –Salas) Instituto de Biología, UNAM-Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza, y World Wildlife Found, México DF, 56-65
- Álvarez-Arteaga G., García C. N.E., Krasilnikov P.V., Sedov S.N., Targulian V.O., Velázquez R. N. 2008. Soil altitudinal sequence on base-poor parent material in a montane cloud forest in Sierra Juárez, southern Mexico. *Geoderma* 144: 593–612
- Álvarez-Sánchez y Harmon, M. 2003. Descomposición de hojarasca: hojas y madera. En *Ecología del suelo en la selva tropical húmeda* (Eds. Álvarez-Sánchez J. y Naranjo-García E.) Instituto de Ecología, A.C., Instituto de Biología y Facultad de Ciencias, UNAM, Xalapa, México.
- Angers D.A. y Mehuys G.R. 1993. Aggregate stability to water. En *soil sampling and methods of analysis* . (Ed. Carter M.R.). Lewis Publishers 651-655.
- Anta F. S. y Mondragón G. F. 2006. Los estatutos comunales: El caso de Santa Cruz Tepetotutla, Usila, Oaxaca. En *Ordenamiento territorial comunitario: Un debate de la sociedad civil hacia la construcción de políticas públicas*. Anta F. S., Arreola M. A.V., González O. M. A. y Acosta G. J. (comp.) INE, México 2006.
- Arellanes C. Y. 2000. Análisis estructural de un bosque mesófilo de montaña de *Ticodendron incognitum* en la Sierra Norte de Oaxaca, México. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México DF
- Attiwil P.M. 1968. The loss of elements from decomposing litter. *Ecology* 49: 142-145
- Bautista- Cruz A., del Castillo R. F. y Gutiérrez C. 2003. Patrones de desarrollo del suelo asociados con sucesión secundaria en un área originalmente ocupada por bosque mesófilo de montaña. *Ecosistemas* 12 (3)

Broll G., Brauckmann H-J., Overesch M., Junge B., Erber C., Milbert G., Baize D., Nachtigale F. 2006. Topsoil characterization-recomemendations for revision and expansion of the FAO-Draft with emphasis on humus forms and biological features. *Journal Plant Nutrition Soil Science* 169: 453-461

Bruijnzeel L.A., y Veneklaas E.J. 1998. Climatic conditions and tropical montane forest productivity: the fog has not lifted yet. *Ecology* 79 (1) 3-9

Buurman P., y Jongmans A.G. 2002. Podzolization - An additional paradigm. *Edafología* 9 (2) 107:114

Buyanovski G.A., Aslam M., y Wagner G.H. 1994. Carbon turnover in soil physical fractions. *Soil Science Society American Journal* 58: 1167-1173.

Challenger A. 2003. Conceptos generales acerca de los ecosistemas templados de montaña de México y su estado de conservación. En *Conservación de ecosistemas templados de montaña en México*. (Eds. Sánchez, Ó., Vega E., Peters E. y Monroy-Vilchis O.) INE, México, 2003

Centeno-García E. 2004. Configuración Geológica del estado. En *Biodiversidad de Oaxaca* (Eds. García-Mendoza A.J., Ordoñez M.J., Briones –Salas) Instituto de Biología, UNAM-Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza, y World Wildlife Found, México DF, 56-65

Cotler A. H. 2003. Características y manejo de suelos en ecosistemas templados de montaña. En *Conservación de ecosistemas templados de montaña en México*. (Eds. Sánchez, Ó., Vega E., Peters E. y Monroy-Vilchis O.) INE, México, 2003.

Coûteaux M. M., Bottner P., Berg B. 1995. Litter decomposition, climate and litter quality. *Tree* 10 (2).

Dixon J. B. y White G. N. 1999. *Soil mineralogy Laboratory manual*. Agronomy 626. Soil and Sciences Department, Texas A&M University. College Station. EUA 164 pp.

Ekschmitt K., Kandeler E., Poll C., Brune A., Buscot F., Friedrich M., Gleixner G., Hartmann A., Käster M., Marhan S., Miltner A., Scheu A. y Wolters V. 2008. Soil - carbon preservation through habitat constraints and biological limitations on decomposer activity. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 171: 27-35.

Evans J.L., Fernandez I.J., Rustad.L., Norton S. 2001. Methods for evaluating carbon fractions in forest soils: a review. *MAFES Technical Bulletin* 178.

Ferrusquía V.I. 1995. Geología de México: Una sinopsis. En *diversidad Biológica de México. Orígenes y Distribución*. Ramamorthy T.P., Bye R., Lot A. Fa J. (comp.) Instituto de Biología. UNAM.

Fisher F.R. y Binkley D. 2000. *Ecology and management of forest soil*. John Wiley & Sons. USA 451 pp.

García – Calderón N. E., Galicia P. M. S., Álvarez A. G., Lasso T. A., Krasilnikov P. 2008. Soil organic carbon stocks and humic substances in extremely acid soils, Sierra Norte Oaxaca, México. En *From molecular understanding to innovative applications of humic substances. Proceedings of the 14th meeting of International Humic Substances Society*. Septiembre 14-19. Rusia.

García-Mendoza A., Ordoñez M. J. Briones S. M. (Eds.) 2004. *Biodiversidad de Oaxaca*. Instituto de Biología . UNAM-Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza, y World Wildlife Found, México D.F.

Gallardo C., J. Meave y A. Rincón. 1998. Plantas leñosas del bosque mesófilo de montaña IV. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 62: 183-186.

Gobat J.M., Arango M., y Matthey W. 2003. *The living soil. Fundamentals of soil science and biology*. Science Publishers Inc. EUA 602 pp.

Golchin A., Oades J.M., Skjemstad J.O. and Clarke P. 1995. Structural and Dynamic Properties of soil organic matter as reflected by ¹³C Natural Abundance, Pyrolysis Mass

Spectrometry and Solid-state ^{13}C NMR Spectroscopy in Density Fractions of an Oxisol under Forest and Pasture. *Australian Journal Soil Research* 33: 59-76.

Guggenberger G. 2005. Humification and mineralization in soils. En *Soil Biology Microorganisms in soils, roles in genesis and functions*. Vol. III (Eds. Buscot F. y Varma A.) Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Hättenschwiler S. 2005. Effects of tree species diversity on litter quality and decomposition. En *Forest Diversity and function: temperate and boreal Systems*. Ecological studies Vol. 176 (Eds. Scherer-Lorenzen M., Körner Ch. y Schulze E.) Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Hillel D. 1998. *Soil physics*. Academic Press EUA. 771 pp.

Hobbie S.E. 1996. Temperature and plant species control over litter decomposition in Alaskan tundra. *Ecological monograph* 66(4) 503-522.

INEGI. 2005. *Síntesis de Información Geográfica del estado de Oaxaca*. 662pp.

Jackson M.L. 1982. *Análisis químico de suelos*. Ediciones Omega, Barcelona. 662pp.

Jabiol B., Zanella A., Englisch A., Hager H., Katzensteiner K., de Wall R.W. 2004. Towards an european classification of terrestrial humus forms. http://www.bodenkunde2.uni-freiburg.de/eurosoil/abstracts/id372_Jabiol_full.pdf

Jenn - Shing C., Chiu C.Y. 2000. Effect of topography on the composition of soil organic substances in a perhumid sub-tropical montane forest ecosystem in Taiwan. *Geoderma* 96: 19-30

Jiménez J.J., Lal R., Russo R.O., Leblanc H. A. 2008. The soil organic carbon in particle size separates under different regrowth forests stands of north eastern Costa Rica. *Ecological Engineering* 34: 300-310.

Kögel-Knaber I., Ekschmitt K., Flessa H., Guggenberger G., Matzner E., Marschner B., y von Lützw M. 2008. An integrative approach of organic matter stabilization in temperate

soils: linking chemistry, physics, and biology. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 171: 5–13.

Luna-Vega I., Morrone J.J., Alcántara A. y Espinosa O. D. 2001. Biogeographical affinities among Neotropical Cloud Forest. *Plant Systematics and Evolution* 228: 229-239.

Lundström U. S., van Breemen N. y Bain D. 2000. The podzolization process. A review. *Geoderma* 94: 91-107

Martínez M.L., Pérez-Maqueo O., Vázquez G., Castillo-Campos G., García-Franco J., Mehlthreter K., Equihua M., y Landgrave R. 2009. Effects of land use change on biodiversity and ecosystem services in tropical montane cloud forest of Mexico. *Forest Ecology and Management* 258: 1856-1863.

Matus F. J., y Maire G. 2000. Relación entre la materia orgánica del suelo, textura, y tasas de mineralización de carbono y nitrógeno. *Agricultura Técnica* 60:2

Mungai W.N. y Motavalli P. P. 2006. Litter quality effects on soil carbon and nitrogen dynamics in temperate alley cropping systems. *Applied Soil Ecology* 31: 32–42

Nieder R. y Benbi D.K. 2008. Soil organic matter characterization. En *Carbon and nitrogen in the terrestrial environment*. Springer Science + Business Media BV.

Nelson D.W. y Sommers L. E. 1982. Total carbon, organic carbon and organic matter. En *Methods of soil analysis* (Eds. Page A.L., Miller R.H) Vol. II. ASA, SSSA, Madison WI. 539-579.

Ordoñez D. J. A. B. 1997. Captura de carbono en un bosque templado: el caso de San Juan Nuevo, Michoacán. INE-SEMARNAP. México 74 pp.

Ortiz P. M. A., Hernández S. J. R. Figueroa M. J. M. 2004. Reconocimiento fisiográfico y geomorfológico. En *Biodiversidad de Oaxaca* (Eds. García-Mendoza A. J., Ordoñez M. J., Briones –Salas) Instituto de Biología, UNAM-Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza, y World Wildlife Found, México DF.

Pagiola S., Landell-Mills N., Bishop J. (comp.) 2003. Los servicios ambientales de los bosques: información general. En La venta de servicios ambientales. INE. México DF.

Pritchett W. L. 1991. Suelos forestales. Propiedades, conservación y mejoramiento. Editorial Limusa. México 634 pp.

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

Porta C.J., López M.R., Roquero C. 1999. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Mundi Prensa. México.

Rincón G. G. A. 2007. Estructura y composición florística de los bosques tropicales húmedos de montaña de Santa Cruz Tepetotutla, Oaxaca, México. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México DF.

Romero R.M.A., Castillo S., Meave J., y van der Wal H. 2000. Análisis florístico de la vegetación secundaria derivada de la selva húmeda de montaña de Santa Cruz Tepetotutla Oaxaca, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 67: 89-106

Rzedowski J. 1978. Vegetación de México. Limusa. México DF.

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 las Ciencias del Suelo A.C. Chapingo México

Schawe M., Glatzel S. y Gerold G. 2007. Soil development along an altitudinal transect in a Bolivian tropical montane rainforest: Podzolization vs hydromorphy. *Catena* 69: 83–90

Schöning I., Totsche K.W., Kögel K.I. 2006. Small scale spatial variability of organic carbon stocks in litter and solum of a forested Luvisol. *Geoderma* 136 (3-4): 631-642

Six J., Feller C., Deneb K, Ogle S., Moraes S.A.C., Albrecht A. 2002. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils - effect of no tillage. *Agronomie* 22: 755-775

Stadmüller T. 1987. Cloud forest in the humid tropics: a bibliographic review. The United Nations University <http://www.unu.edu/unupress/unupbooks/80670e/80670E00.htm>

Swift R. S. 2001. Sequestration of carbon by soils. *Soil Science*. 166 (11): 858-871

Stefan S., Ruess L., Bonkowski M. 2005. Interactions between microorganisms and soil Micro-and meso fauna. En *Soil biology microorganisms in soils, roles in genesis and functions*. Vol. III (Eds. Buscot F. y Varma A.) Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Trejo I. 2004. Clima. En *Biodiversidad de Oaxaca* (Eds. García-Mendoza A.J., Ordoñez M.J., Briones - Salas) Instituto de Biología, UNAM-Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza, y World Wildlife Found, México DF

Tanner E.V.J. 1980. Litterfall in montane rain forest of Jamaica and its relation to climate. *Journal of Ecology* 68: 933-848

Tapia-Coral, S.C., Luizao F.J., Wandelli E., C.M. Fernandez E. 2005. Carbon and nutrient stocks in the litter layer of agroforestry systems in central Amazonia, Brazil. *Agroforestry Systems* 65: 33-42

Torres C. R. 2004. Tipos de vegetación. En *Biodiversidad de Oaxaca* (Eds. García-Mendoza A.J., Ordoñez M.J., Briones - Salas) Instituto de Biología, UNAM-Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza, y World Wildlife Found, México DF.

van der Wal. 1996. Plan de manejo de los recursos naturales en dos comunidades chinantecas de Oaxaca. Reporte Final WWF. PAIR-UNAM

van Reeuwijk L.P. (Ed.) 2002. Procedures for soil analysis. ISRIC - FAO. ISRIC Technical paper No. 9. 6th Ed.

van Wesemael B. 1993. Litter decomposition and nutrient distribution in hummus profiles in some mediterranean forest in southern Tuscany. *Forest ecology and management*. 57: 99 - 114

Velázquez R.N. 1997. Características foliares de los árboles de bosques húmedos de montaña en la región de la Chinantla, Sierra Norte de Oaxaca. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias. UNAM

Velázquez - Rosas N., J. Meave y S. Vazquéz Santana. 2002. Elevational variation of leaf traits in montane rain forest tree species at la Chinantla, southern México. *Biotropica* 34 (4): 534-546

Webster G.L. 1995. The panorama of the neotropical montane forest. En *Biodiversity and conservation of neotropical montane forest* (Eds. Churchill S.P. Balslev H. Forero E. y J.L. Luteyn) pp. 53-77 . New York Botanical Garden Press. Nueva York.

Wilcke W., Yasin S., Abramowski U., Valarezo C., y Zech W. 2002. Nutrient storage and turnover in organic layers under tropical montane rain forest in Ecuador. *European Journal of Soil Science* 53: 15-27.

Wilde S.A., Corey R.B., Lyer J.G., Voigt G.K. 1979. *Soil and plant analysis for tree culture*. Oxford & IBH. India

WRB 2007. *World Reference Base for Soil Resources*. IUSS Working Group. 2nd ed. *World Soil Resources Reports No. 103* FAO, Rome.