



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

## FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

**DISTRIBUCIÓN DEL SISTEMA RADICAL EN UN BOSQUE  
MESÓFILO DE MONTAÑA EN LAS SIERRAS TRIQUI-MIXTECA.**

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

**ANA CAROLINA CUAHUTLE GÓMEZ**

**DIRECTOR DE TESIS M. EN C. RAMIRO RÍOS GÓMEZ**  
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN EN SISTEMÁTICA VEGETAL Y SUELO.  
LABORATORIO DE RESTAURACIÓN DE SUELOS.

PROYECTO FINANCIADO POR DGAPA-PAPIIT IN-225210-3



México, D.F.

Mayo, 2012.



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## *Agradecimientos*

Al M. en C. Ramiro Ríos Gómez por permitirme ser su tesista, por su valioso tiempo y enorme dedicación, así como, su ayuda en la realización del presente trabajo y los buenos consejos brindados que han dejado huella en mi vida. ¡¡INFINITAS GRACIAS MAESTRO!!

A los sinodales Biól. Elvia García Santos, M. en C. Jorge Gutiérrez Gallegos, Dr. Arcadio Monroy Ata y al Dr. Eloy Solano Camacho, por sus valiosas recomendaciones para mejorar el presente trabajo.

Al Dr. Eloy Solano Camacho y al M. en C. Jorge A. Gutiérrez Gallegos por su apoyo en el trabajo de campo.

Al Dr. Gerardo Cruz Flores por sus consejos y asesoría en los análisis químicos.

A Dulce Alvarado, por su infinito apoyo en campo y laboratorio, sobre todo por la amistad forjada en aquellas tardes inolvidables y divertidas separando raíces y hojarasca, nunca lo olvidare. ¡¡MIL GRACIAS!!

A mi familia en campo, Dulce Alvarado, Beatriz González, Gabriela Martínez, Merari Naranjo, Carmelo Cortés, Mario y al M. en C. Ezequiel Hernández por todos los momentos de trabajo y diversión en las salidas a campo.

A mi amiga y hermana Alejandra Flores, por todo lo que hemos compartido, las palabras de ánimo y el apoyo brindado cuando creí no poder.

A mis amigos de toda la carrera Fernanda Vera, Bernardo Guerrero y Rodolfo Ruíz, por los bellos y divertidos momentos que pasamos dentro y fuera de las aulas de clases.

A Carmen Juárez por todas aquellas caminatas, pláticas y consejos aportados, eres una luz en mi camino.

A Moisés Moreno por sus palabras de aliento y amistad incondicional, gracias por cruzarte en mi vida y verla de una forma más divertida.

A Eunice Gonzales, Luz Ma. Santiago, Mirna Hernández, Natalie López, y Gabriel Correo, por su apoyo incondicional y su paciencia infinita en mis momentos de frustración.

Por último a todas aquellas personas que compartieron conmigo una parte de sus vidas en las aulas de clases durante toda mi vida académica.

*“No basta con dar pasos que un día puedan conducirnos hasta la meta, sino que cada paso ha de ser una meta, sin dejar de ser un paso”.*

*Johan Wolfgang Goethe*

## *Dedicatoria*

A mis padres: Teodora Gómez y Germán Cuahutle, por darme la vida, ser mi motor y un ejemplo a seguir. Por sus enormes consejos, enseñanzas, apoyo, dedicación, confianza y su amor incondicional brindados para ser una persona de bien. Por todos los sacrificio que realizaron para que concluyera con éxito la carrera, sin esperar algo a cambio. Sin ustedes este logro no seria posible ¡¡MIL GRACIAS, **LOS AMO**!!

A mis hermanos: Luis y Jorge Cuahutle, por las travesuras compartidas, las experiencias buenas y malas vividas que nos hicieron madurar y fortalecer, pero sobre todo, por su cariño y apoyo brindado ¡¡LOS QUIERO!!

A mis abuelos: Luisa Gómez, Regina Cuahutle y Vicente López por alentarme para concluir los estudios. Por su infinito amor brindado, sus sabios consejos, mismos que han forjado y experimentado a lo largo de su vida, y me han transmitido. ¡¡GRACIAS!!

A mis adorables y pequeños diablillos Keylen, Nesy, Derek, Germán y Fernando, que han alegrado mis días, logrando ver mi buen y mal carácter en un instante.

A todas (os) mis tías (os) y primos (as) por mostrarme su apoyo a lo largo de mi vida y compartir momentos agradables en familia, no tengo palabras para agradecerles.

*“Gracias por haberme protegido lo suficiente,  
como para sobrevivir y haberme dejado lo  
suficientemente libre, como para equivocarme”.*

Contenido	Pág.
Resumen	
I. Introducción.....	6
II. Revisión de literatura.....	7
2.1. Raíz.....	7
2.2. Sistema radical.....	8
2.3. Raíces finas.....	8
2.4. Suelo.....	9
2.5. Nutrimentos.....	10
2.6. Bosque mesófilo de montaña.....	12
III. Justificación.....	13
IV. Objetivos.....	13
4.1. General.....	13
4.2. Específicos.....	13
V. Hipótesis.....	13
VI. Área de estudio.....	14
VII. Material y métodos.....	15
7.1. Fase De Campo.....	15
7.2. Fase de Laboratorio.....	16
7.3. Fase de gabinete.....	19
VIII. Resultados.....	22
8.1. Caracterización de la vegetación.....	22
8.2. Descripción morfológica de los perfiles de suelo.....	24
8.3. Propiedades físicas y químicas del suelo.....	35
8.4. Longitud, área y biomasa radical.....	38
8.5. Nutrimentos en mantillo, suelo y raíz.....	41
IX. Discusión.....	49
9.1. Clasificación de suelos.....	49
9.2. Propiedades edáficas.....	50
9.3. Interface raíz- suelo.....	51
9.4. Relación de nutrimentos entre mantillo-suelo-raíz.....	54
X. Conclusiones.....	60
Literatura citada.....	62

## Índice de Cuadros

Pág.

1. Diagrama de flujo de la metodología .....	21
2. Especies dominantes del bosque mesófilo de montaña de San Andrés Chichahuaxtla. ....	22
3. Número de especies por Familias encontradas en el BMM.....	23
4. Índices de Equidad (H') y Dominancia ( $\lambda(\ln)$ ) entre los transectos mustreados. .....	23
5. Porcentaje de similitud de las especies vegetales en un fragmento de BMM. ...	24
6. Caracterización ecológica del sitio y descripción morfológica del suelo.....	25
7. Caracterización ecológica del sitio y descripción morfológica del suelo.....	27
8. Caracterización ecológica del sitio y descripción morfológica del suelo.....	29
9. Caracterización ecológica del sitio y descripción morfológica del suelo.....	31
10. Caracterización ecológica del sitio y descripción morfológica del suelo.....	33
11. Propiedades físicas de las muestras de suelo recolectadas en los cinco perfiles edáficos del BMM.....	35
12. Propiedades químicas de las muestras de suelo recolectadas en el BMM de San Andrés Chichahuaxtla, Oaxaca. ....	36
13. Correlaciones de las propiedades físicas y químicas del suelo.....	37
14. Correlación de longitud radical con las propiedades edáficas.....	37
15. Análisis multivariado de varianza (MANOVA) para longitud y área de superficie expuesta por el sistema radical.....	40
16. Biomasa de las clases diamétricas .....	40
17. Análisis de varianza (MANOVA) para biomasa.....	41
18. Contenido de nitrógeno, fósforo, potasio, hierro y azufre en el horizonte orgánico.....	41
19. Contenido de nutrimentos en las muestras de suelo recolectadas en el BMM..	42
20. Correlación de los nutrimentos con las propiedades del suelo.....	43
21. Análisis de varianza para los nutrimentos del suelo. ....	43
22. Contenido de nutrimentos por clase diamétrica del sistema radical.....	45
23. Correlaciones entre nutrimentos del sistema radical presentes en mantillo y suelo ( $\alpha < 0.05$ ). ....	46
24. Análisis de varianza de nutrimentos y diámetro radical en suelo y mantillo...	47
25. Análisis de varianza para la longitud y área de superficie del sistema radical con el contenido nutrimental del mismo, se indican únicamente las diferencia significativas.....	48

1. Mapa de la zona de estudio.....	14
2. Perfil de un Cambisol en el que se muestra el monolito formado por la toma de muestra para el análisis del sistema radical. ....	25
3. Perfil de un Cambisol. ....	27
4. Perfil de un Cambisol en el que se muestra el monolito formado por la toma de muestra para el análisis del sistema radical. ....	29
5. Perfil de un Leptosol en el que se muestra el monolito formado por la toma de muestra para el análisis del sistema radical. ....	33
6. Variación de la pedregosidad a lo largo de los perfiles. ....	38
7. Variación de la a) longitud y b) área de superficie expuesta del sistema radical del bosque mesófilo de montaña a lo largo del perfil de suelo en San Andrés Chicahuaxtla, Oaxaca.....	38
8. a) y b) Porcentaje de longitud de los cinco grupos dimétricos de raíces encontradas en suelo y mantillo respectivamente.....	39
9. Porcentaje de superficie expuesta de las distintas clases de raíces. Encontradas en a) suelo y b) mantillo. ....	39
10. Variación de la biomasa del sistema radical .....	40
11. Porcentaje de biomasa radical total para a) suelo y b) mantillo del BMM.....	41
12. Prueba de Tukey para los nutrimentos del suelo, se muestran únicamente las variables con diferencia significativas. ....	44
13. Contenido de nutrimentos de las raíces encontradas en suelo mineral y mantillo del bosque mesófilo de montaña.....	46
14. Variación del contenido de nutrimentos por clase diamétrica, se muestran únicamente las diferencias significativas.....	47
15. Modelo hipotético del aporte de nutrimentos disponibles en el fragmento de bosque mesófilo de montaña de San Andrés Chicahuaxtla, el grosor de las flechas indica la importancia relativa de un proceso particular.....	49

## RESUMEN

Se analizó la distribución de la biomasa, longitud y área del sistema radical, así como, el contenido de N, P, K, Fe y S en mantillo, suelo y tejido radical de un bosque mesófilo de montaña (BMM) localizado en las sierras Triqui-Mixtecas, del estado de Oaxaca. Se seleccionaron cinco sitios conservados, en cada sitio se realizó la apertura de un perfil de suelo y se describió morfológicamente, se practicaron dos tipos de muestreo, uno por horizonte genético para la caracterización física y química del material suelto y otro para analizar la distribución del sistema radical, en este último caso se extrajeron muestras a lo largo de un monolito de 20x20 cm de arista y cada 10 cm de espesor hasta la profundidad de 150 cm. Las raíces fueron separadas del mantillo y suelo mineral, clasificadas en: menores a 0.5 mm (raíces extremadamente finas), 0.6-1.0 mm (raíces muy finas), 1.1-2.0 mm (finas), 2.1-3.0 mm (gruesas) y mayores de 3.0 mm (muy gruesas), con la finalidad de conocer su distribución en el perfil edáfico y contenido de nutrimentos. Se encontró que la distribución de la biomasa, longitud y área radical disminuyen conforme aumenta la profundidad del perfil, coincidiendo con los cambios en las propiedades físicas, químicas y disponibilidad de nutrimentos del suelo, razón por la cual, el mayor contenido de raíces finas se encontró en el horizonte O. Se concluye que los mayores contenidos de N, P, K, Fe y S se encontraron en las raíces menores a 2 mm de diámetro, al ser estas las que juegan un papel importante en la absorción de nutrimentos.

**Palabras clave:** *distribución, sistema radical fino, suelo y ciclo de nutrimentos.*



## I. INTRODUCCIÓN

Dada la ubicación de México dentro de los trópicos y algo distante de las zonas del planeta dominadas por ecosistemas templados, la presencia de estos en el país se relaciona con la altitud y con su vínculo al clima. A mayor altitud la temperatura baja, por lo que los ecosistemas templados de México se asocian estrechamente con las zonas montañosas (Challenger, 2003). Entre estos ecosistemas se encuentra el bosque mesófilo de montaña con una extensión aproximada de 180,000 km<sup>2</sup>, a nivel nacional cuenta con una distribución fragmentada y es una prioridad para la conservación por sus características notables y únicas de composición florística y riqueza de especies (Santiago-Pérez *et al.*, 2009; Villaseñor, 2010). En los BMM las diferencias en la vegetación están determinadas por la gran diversidad de condiciones morfo-edáficas, ya que estos bosques cubren distintas condiciones geológicas, morfométricas (pendiente, tipos de relieve) y edáficas (pH, materia orgánica, salinidad, disponibilidad de nutrientes, textura, profundidad y compactación) que involucran desde suelos profundos y desarrollados hasta suelos superficiales e incipientes determinando la distribución de la vegetación (Cotler, 2003; Escamilla *et al.*, 2005).

En este contexto, la distribución del sistema radical es el resultado de factores tanto internos como externos a la planta, influenciando el crecimiento de las raíces dentro del suelo y a su vez interactuando con sus propiedades, determinando así la disponibilidad de nutrientes y competencia entre la vegetación. Además, la biomasa, longitud y diámetro del sistema radical está directamente relacionado con las condiciones favorables para la fotosíntesis, la estructura y composición florística del bosque, así como, las propiedades del suelo, la disponibilidad de nutrientes y su variación con micrositios (Barreto y León, 2005).

De este modo para entender la bioquímica y ecología terrestre, es necesario registrar información acerca de la distribución y crecimiento de las raíces. El presente estudio trata de explicar la interrelación de las propiedades edáficas y la distribución de las raíces a lo largo del perfil del suelo, así como analizar que clase diamétrica absorbe más nutrientes y definir el espesor del suelo que más directamente es fuente de recursos del fragmento de bosque mesófilo de San Andrés Chicahuaxtla.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. RAÍZ

La raíz constituye la porción inferior del eje de las plantas vasculares (Luque, 2000), es el órgano subterráneo (Fuentes, 2009) formando el nexo entre la planta y el suelo, compuesta de tejido meristemático que se va desarrollando a medida que está crece (Silveira, 2004), se forma a partir de la radícula del embrión después de la germinación y ésta a su vez origina a las raíces laterales.

En la raíz se pueden distinguir cuatro zonas: a) la cofia, es una estructura situada en el extremo inferior, que tiene por función proteger al meristemo del roce contra el suelo; b) zona de crecimiento, en ella tiene lugar el crecimiento de la raíz que se forman en el meristemo apical; c) zona pilífera, que contiene numerosos pelos, cortos y finos, que absorben el agua y nutrimentos. Esta zona se desplaza continuamente hacia el extremo de la raíz, ya que la actividad de pelos absorbentes se reduce a medida que envejecen y cesa cuando mueren y d) zona suberosa, es la zona más próxima a la base del tallo. Está recubierta por súber, que sustituye a los pelos absorbentes cuando éstos se han desprendido. En esta zona se forman las raíces laterales (Fuentes, 2001).

El sistema radical primario es resultado de un crecimiento derivado de meristemas laterales, en el cual se pueden considerar: la epidermis constituida de células alargadas y con membranas delgadas de larga persistencia que pueden presentar lignificación o estar impregnadas con sustancias de colores oscuros, una característica típica de la epidermis radical es el desarrollo de pelos que quedan reducidos a una región de uno o varios centímetros de longitud cerca del extremo de la raíz. La Caliptra estructura que protege al meristemo radical y ayuda a la raíz en su penetración del suelo durante el crecimiento, sus células son parenquimáticas vivas que a menudo contienen almidón. El cortex radical, puede ser de estructura homogénea y simple, se desarrolla a partir de una o dos capas de células derivadas de células apicales iniciales, la capa cortical más interna de las raíces esta diferenciada como endodermis, la cual esta provista de Bandas de Caspary constituidas de suberina, sustancias lipídicas y fenólicas, formando una barrera en la que la solución del suelo es forzada a pasar a través del citoplasma, selectivamente permeable, y no a través de la membrana celular; las capas corticales subepidérmicas de la raíz (exodermis) se diferencian como tejido protector provisto de suberina. El cilindro vascular está compuesto por el sistema vascular y parénquima asociado, se halla dispuesto de manera compacta rodeado por el periciclo; en el sistema vascular el floema se presenta en forma de cordones distribuidos cerca de la periferia del cilindro vascular, por debajo del periciclo. El xilema forma cordones discretos, que alternan con los cordones floemáticos (Esau, 1985).

El crecimiento secundario generalmente destruye la epidermis y los pelos radicales. A veces las células hipodérmicas se suberisan, produciéndose un cambium de corcho o felúgeno en la parte exterior de la corteza radical.

## **2.2. SISTEMA RADICAL**

Al conjunto de todas las raíces de una planta se le llama sistema radical (Fuentes, 2001), la extensión de éste depende de diversos factores, pero generalmente la mayoría de las raíces se encuentran en el primer metro de suelo (Ramírez-Correa, 2007). Los sistemas radicales pueden ser diferentes en arquitectura o topología, es decir, en la configuración espacial y el patrón de ramificación respectivamente, que determinan su capacidad de exploración del suelo, el diámetro, la densidad, las relaciones de longitud y rasgos anatómicos como el crecimiento vascular, patrones de división celular y elongación (Nicotra, 2001). La distribución y morfología de las raíces finas son resultado de factores internos como el genotipo de la planta y varios factores externos (temperatura, precipitación, las propiedades del suelo, disponibilidad de nutrientes y la competencia entre plantas) (Borken, 2007).

La actividad del sistema radical está especializado en: 1) La absorción que se localiza en el extremo de las raíces, entre el ápice y la zona de suberización, donde se desarrollan los pelos radicales. La existencia de pelos absorbentes es de corta duración, rápidamente pierden turgencia y degeneran; no obstante, a medida que los más viejos desaparecen, la raíz forma otros nuevos que establecen contacto con partes del suelo continuamente renovadas (Wild, 1992), 2) Fijación, la raíz desarrolla esclerénquima formando un rígido órgano de sostén, 3) Almacenamiento, las raíces primarias almacenan alimentos, especialmente almidón en el cortex, y 4) La síntesis de varios compuestos orgánicos (Kramer, 1975).

## **2.3. RAÍCES FINAS**

La importancia de las raíces finas para el funcionamiento del ecosistema, se halla no sólo por su participación en la productividad primaria neta de hasta 80%, sino también en los ciclos biogeoquímicos de los bosques (Barreto y León, 2005; Pavón, 2000), debido a que su tasa de descomposición supera al de la hojarasca (Zhou, y Shangguan, 2007), contribuyendo significativamente al enriquecimiento de los horizontes orgánicos por su rápida transformación jugando un rol ecológico clave abasteciendo a las plantas de agua y nutrientes.

Dado que la mayoría las raíces finas se distribuyen superficialmente dentro de los primeros centímetros de suelo (Barreto, 2005), son afectadas negativamente por los diferentes tipos de estrés en el ambiente, por ejemplo, la sequía, las heladas y los movimientos del viento (Persson, 2009), así como los efectos de la labranza, la compactación y la distribución y cantidad de macroporos (Schenk, 2005). Estimándose que en bosques húmedos tropicales el 57 % de la biomasa de raíces finas se encuentra en los primeros 30 cm del suelo. Sin embargo, la profundidad hasta la

cual pueden penetrar las raíces finas está relacionada con la tasa de infiltración de nutrimentos y las relaciones hídricas hasta 30-40 cm de profundidad.

#### **2.4. SUELO**

El suelo es la capa más superficial de la corteza terrestre, constituye uno de los recursos naturales más importantes con que cuenta el ser humano, (Ortiz, 2008), es dinámico, altamente reactivo, en constante evolución y sujeto a los ritmos marcados a diario y estacionales de su entorno (Mayer, 2005). Su formación es un proceso lento que está condicionado por varios factores externos como: clima, temperatura, topografía y tiempo. El suelo deriva de un material parental de composición mineral heterogénea, estos materiales determinan en gran parte las propiedades de éste (Pritchett, 1991) siendo el resultado de un equilibrio dinámico entre procesos como transformaciones, translocaciones, pérdidas y adiciones, originando un perfil desarrollado, constituido por cuatro horizontes: una capa orgánica (O); una zona de lixiviación, formado por el suelo superficial y en donde se encuentra la mayor parte de la materia orgánica (A); una zona de transición y acumulación, constituye la capa intermedia, en donde la cantidad de materia orgánica es menor (B); y el material parental no intemperizado, que es la capa más profunda del perfil (C) (Navarro y Navarro, 2003).

El ambiente edáfico así como el clima desempeñan un papel esencial en el crecimiento y desarrollo de los bosques proporcionando agua, nutrimentos y un medio de sostén para la vegetación forestal. (Pritchett, 1991). Aunque generalmente no es evidente a simple vista, es un hábitat variado y uno de los subsistemas más complejos de la naturaleza, contiene miles de organismos diferentes, los cuales interactúan e intervienen en los ciclos globales que hacen posible toda forma de vida. La biota del suelo incluye también las raíces que crecen en él e interactúan con otras especies sobre y bajo el suelo (FAO, 2002).

La cubierta forestal es una característica distintiva de los suelos, constituye la zona donde vastas cantidades de restos vegetales (hojas, ramas, corteza, frutos), animales así como de humus se desintegran por encima de la superficie mineral, gran parte de estos restos, se mezclan gradualmente con el suelo mineral y junto con las partes subterráneas de la planta, formando la fracción orgánica del suelo. Contiene una gran proporción de los nutrientes extraídos del suelo por los árboles, con sólo un porcentaje relativamente pequeño retenido por la biomasa en crecimiento (Pritchett, 1991). La velocidad de descomposición depende de la naturaleza química de las sustancias que lo conforman, así como del clima y el tipo de suelo en donde se encuentra (Navarro, 2003). El humus influye en las propiedades físicas del suelo, proporcionándole un color oscuro favoreciendo la absorción solar y aumentando la temperatura, le da la estructura granulosa facilitando una mayor porosidad favoreciendo la aireación y el drenaje, también favorece la formación y desarrollo de raíces primaria y secundarias.

El suelo puede ser un indicador de las diferencias en el tipo y distribución de la vegetación en un ecosistema dado, debido a sus características físicas y químicas, así la agregación determina importantes propiedades de éste, como la estructura, infiltración, retención de agua y almacenamiento de carbono (Velásquez, 2008).

## 2.5. NUTRIMENTOS

La principal fuente de los elementos minerales que las plantas necesitan para su crecimiento, desarrollo y producción son suministrados por el suelo. Los nutrientes que actualmente se consideran esenciales para las plantas son los macronutrientes C, H, O, N, P, K, Ca, Mg, S, los cuales son requeridos en mayores cantidades y los micronutrientes Fe, Mn, Cu, Zn, B, Mo, Co y Cl, estos son demandados por las plantas en pequeñas cantidades (Wild, 1992). Todos ellos desempeñan funciones importantes en la vida de la planta y cuando están presentes en cantidades insuficientes, pueden producir en ella graves alteraciones y reducir notablemente el crecimiento. En el suelo existen dos fuentes generales de nutrientes fácilmente asimilables por la planta, unos adsorbidos por coloides, y otros que forman parte de la disolución del suelo. En ambos casos los elementos esenciales están presentes como iones, cationes cargados positivamente y adsorbidos por coloides en su mayor parte, mientras que los aniones y una pequeña fracción de cationes se hallan en la disolución del suelo (Navarro y Navarro, 2003). Esta reserva alimenticia, fácilmente asimilable por la planta es muy pequeña en comparación con la cantidad total. Casi el 98% de los bioelementos forman parte de restos orgánicos, materiales húmicos, compuestos inorgánicos difícilmente solubles, sin embargo, en su forma asimilable las partículas coloidales representa el 2% y menos de 0.2% se encuentran en disolución.

En cuanto al nitrógeno éste se encuentra ampliamente distribuido en la naturaleza, es un elemento esencial para todos los seres vivos, además, de ser un componente específico de las proteínas, está presente en diversas combinaciones orgánicas de las plantas. La mayor parte del nitrógeno del suelo se encuentra en la materia orgánica (Navarro y Navarro, 2003). Dentro del suelo es aprovechado por las plantas, animales y microorganismos que lo incorporan a sus tejidos. Cuando dichos organismos se mueren, el nitrógeno reingresa al suelo completando el ciclo (Martínez *et al.*, 2006). Las formas químicas disponibles para la planta y absorbidas por las raíces son,  $\text{NO}_3^-$  siendo la principal fuente ya que es muy móvil y  $\text{NH}_4^+$  el cual es tomado principalmente por los microorganismos (Mengel y Kirkby, 2001). Las raíces absorben nitrógeno inorgánico pues es la fracción disponible para las plantas y su contenido generalmente es menor al 10% del total, ya que es la única forma como lo acumulan sin efectos perjudiciales (Black, 1975). La asociación con micorrizas aumenta la superficie de absorción y con ello la eficiencia en la adquisición de nitrógeno (Donoso, 1997).

El fósforo se encuentra en todos los tejidos de la planta en una concentración variable, según la parte vegetativa que se considere, en la solución del suelo está presente como  $\text{PO}_4^{3-}$  y  $\text{PO}_4\text{H}_2^-$  las plantas pueden absorberlo casi en su totalidad. Los compuestos formados por este macronutriente pueden encontrarse en forma

disuelta, sales cristalinas o adsorbidas por los coloides del suelo. El ion fosfato puede, además, formar enlaces de gran estabilidad con los hidróxidos de Fe, Al o Mn. Si la disponibilidad del fósforo del suelo es alta, las plantas jóvenes lo absorben con rapidez (Black, 1975). La única forma de fósforo de importancia en ecosistemas forestales es el fosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) y su ciclo incluye componentes biológicos y geoquímicos (Fisher, 2000). El fósforo a menudo aparece como un nutrimento limitante en los suelos debido a que los equilibrios de reacción dependerán de los coloides y minerales presentes en el suelo, el pH, la actividad microbiológica, la presencia de enzimas y ácidos orgánicos y la intensidad de la demanda del nutrimento (Montecinos, 1997).

Las plantas disponen de potasio en la solución del suelo sólo en forma de  $\text{K}^+$ . Las raíces, en menor medida, pueden tomar el  $\text{K}^+$  absorbiéndolo directamente de la superficie del coloide. Es el nutrimento que menores problemas de disponibilidad presenta. Éste puede ser retenido en sitios de intercambio y ser incorporado a su biomasa (Fisher, 2000). La fuente principal de  $\text{K}^+$  bajo condiciones naturales viene del intemperismo de minerales que contienen potasio (Mengel, 2001). La asociación con micorrizas aumenta la tasa de absorción de  $\text{K}^+$  alrededor de dos veces con relación a organismos no infectadas (Donoso, 1997). Debido a su gran movilidad dentro de la planta neutraliza los ácidos orgánicos resultantes del metabolismo, asegurando la constancia de la concentración en  $\text{H}^+$ , también desempeña una función importante en la fotosíntesis y especialmente como activador enzimático (Navarro y Navarro, 2003).

Los vegetales obtienen el hierro del suelo, donde está presente principalmente en la forma férrica ( $\text{Fe}^{3+}$ ), en óxidos como  $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  y  $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$ . A pH neutro el ión férrico es altamente insoluble. Para absorber cantidades suficientes de hierro de la solución del suelo, las raíces han desarrollado varios mecanismos que aumentan la solubilidad del hierro y así su disponibilidad. Estos mecanismos son: 1) acidificar el suelo, ya que de esta forma se aumenta la solubilidad del hierro férrico ( $\text{Fe}^{3+}$ ). 2) Reducir el ión férrico a formas de hierro más solubles ( $\text{Fe}^{2+}$ ). 3) liberar compuestos que forman complejos estables y solubles con el hierro (Taiz, 2006). El hierro desempeña un papel importante en la química del suelo, participando en numerosas reacciones que afectan sus propiedades, y en consecuencia a la nutrición de la planta, influyendo considerablemente en la disponibilidad de otros micronutrientes (Navarro y Navarro, 2003).

El azufre se encuentra principalmente en la materia orgánica bajo las formas orgánica y mineral (sulfato y sulfuro). La forma orgánica, que representa la mayor parte del azufre, se transforma en ión sulfato por vía química y microbiana. Las transformaciones del azufre orgánico en mineral, tienen un cierto paralelismo con las transformaciones del nitrógeno orgánico (Oliveira, 2006). Una gran cantidad del azufre presente en las células de las plantas superiores procede sobre todo del sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) incorporado desde el suelo a través de un transportador ( $\text{H}^+/\text{SO}_4^{2-}$ ) (Taiz, 2006). En pequeñas cantidades también puede ser absorbido como  $\text{SO}_3^{2-}$  y de la atmosfera como dióxido de azufre, a través de los estomas (Navarro y Navarro, 2003). Debido a su carga negativa el S no es atraído por las arcillas del suelo y los coloides

orgánicos, excepto en ciertas condiciones. Se mantiene en la solución del suelo y se mueve con el flujo de agua, por lo tanto, se puede lixiviar fácilmente.

La transferencia de los nutrimentos desde el suelo hacia la planta es producida a través de tres mecanismos básicos para que sus formas iónicas sean absorbidas: a) intercepción, las raíces en crecimiento activo, interceptan iones en la disolución del suelo y los absorben. La velocidad de absorción es mayor si en el ambiente rizosférico hay micorrizas, que incrementan la velocidad de absorción de agua y de algunos nutrimentos; b) flujo de masas. Es un movimiento convectivo de iones, que ocurre desde la solución del suelo hasta la superficie de las raíces; y c) difusión, que ocurre cuando un ión se mueve desde un sitio de alta concentración, hacia un sitio de baja concentración, con movimientos estimulados termalmente y al estar disponible la forma iónica del nutrimento, las raíces lo absorben (Junk, 2001). La epidermis de la raíz es semipermeable y funciona como barrera al paso libre de agua y nutrimentos hacia el interior de la planta (Escamilla *et al.*, 2005), actividad que está determinada por factores intrínsecos de la planta como la capacidad de absorción radical, metabolismo, etapa fenológica y órganos de almacén (Borken, 2007) y físicos como temperatura, humedad, disponibilidad de nutrimentos y en general de las propiedades físicas del suelo (Pavón y Briones, 2000).

## **2.6. BOSQUE MESÓFILO DE MONTAÑA**

El bosque mesófilo de montaña (BMM), se distribuye en menos del 1% de la superficie del territorio nacional, se calcula que alberga casi 12% de la riqueza de plantas en el país, de las cuales aproximadamente el 30% son endémicas (Toledo, 2009), también constituyen una compleja transición entre las comunidades de tierras bajas termófilas y las comunidades de ambientes templados localizadas a mayor altitud (Mejía, 2004). Frecuentemente está asociado a rocas calizas y suelos ricos en materia orgánica en los horizontes superiores y pH ácido. El piso forestal, a menudo se encuentra en terrenos kársticos (relieve originado por la disolución de la roca caliza) de drenaje rápido (Rzedowski, 1988) y los suelos son húmedos, someros o profundos; amarillos, rojos o pardos, con alto contenido de materia orgánica y humus tipo Moor (Gutiérrez, 2003). La hojarasca foliar como parte del mantillo es la principal fuente de nutrimentos del suelo forestal (Pizzani, 2005). Presenta un mejor desarrollo en terrenos planos o ligeramente ondulados (Rzedowski, 1988), y está constituido por diversas asociaciones, que a menudo difieren entre sí en cuanto a especies dominantes. Florísticamente la familia Orchidaceae es la mejor representada de las angiospermas, le siguen en importancia Compositae, Rubiaceae y Melastomataceae; mientras que, las gimnospermas están representadas por los géneros *Abies*, *Pinus* y *Podocarpus* (Valdez, 2003).

Las condiciones climáticas que requiere este tipo de vegetación se presentan en zonas restringidas del territorio de la República Mexicana, entre los 1000 y 3000 metros de altitud, con una distribución fragmentada, la cual ha sido registrado en 20 de las 32 entidades federativas (Villaseñor, 2010). La precipitación media anual probablemente nunca es inferior a 1000 mm, comúnmente pasa de 1500 mm y en

algunas zonas excede de 3000 mm. La temperatura media anual varía de 12 a 23°C y en general se presentan heladas en los meses más fríos (Rzedowsky, 1988).

### **III. JUSTIFICACIÓN**

Con base en estudios como el de Gálvez (2003); Borken (2006); Doll *et al.* (2008); Hishi (2007) y Bae (2008) entre otros, sobre la cuantificación de nutrimentos en raíces, donde dividen las raíces en dos grupos: raíces finas < 2 mm de diámetro y raíces gruesas 2-5 mm de diámetro, se ha encontrado que su importancia funcional en la absorción de recursos se incrementa con la reducción de su diámetro. En este sentido el presente estudio tuvo como finalidad cuantificar el contenido de cinco nutrimentos y la cantidad de raíces a lo largo del perfil de suelo, dividiéndolas en cinco grupos: <0.5 mm, 0.6-1.0 mm, 1.1-2 mm, 2.1-3 mm y >3 mm. Con el propósito de analizar cuál de estos absorbe más nutrimentos y definir el espesor del suelo que más directamente es fuente de recursos de la comunidad.

### **IV. OBJETIVOS**

#### **4.1. GENERAL**

- ❖ Conocer la distribución radical en el perfil de suelo del bosque mesófilo de montaña.

#### **4.2. ESPECÍFICOS**

- ❖ Cuantificar la biomasa de las raíces a lo largo del perfil de suelo.
- ❖ Describir el tipo de suelo de la zona de estudio.
- ❖ Determinar el contenido de fósforo, nitrógeno, potasio, hierro y azufre en los almacenes: suelo, mantillo y raíz del bosque.
- ❖ Explicar la interrelación de las propiedades del suelo con la distribución de las raíces.

### **V. HIPÓTESIS**

La distribución del sistema radical del BMM, se relaciona positivamente con la disponibilidad de N, P, K, Fe y S en el perfil de suelo.



## VI. ÁREA DE ESTUDIO.

Se trabajó en un bosque mesófilo de montaña del municipio de Putla Villa de Guerrero, Oaxaca, localizado al suroeste del estado, en la región conocida como Mixteca alta en la localidad de San Andrés Chicahuaxtla. La zona de estudio se ubica al norte de la cabecera municipal, entre las coordenadas 17° 9' 29" N; 97° 39' 27" O y 17° 9' 23" N; 97° 49' 12" O.

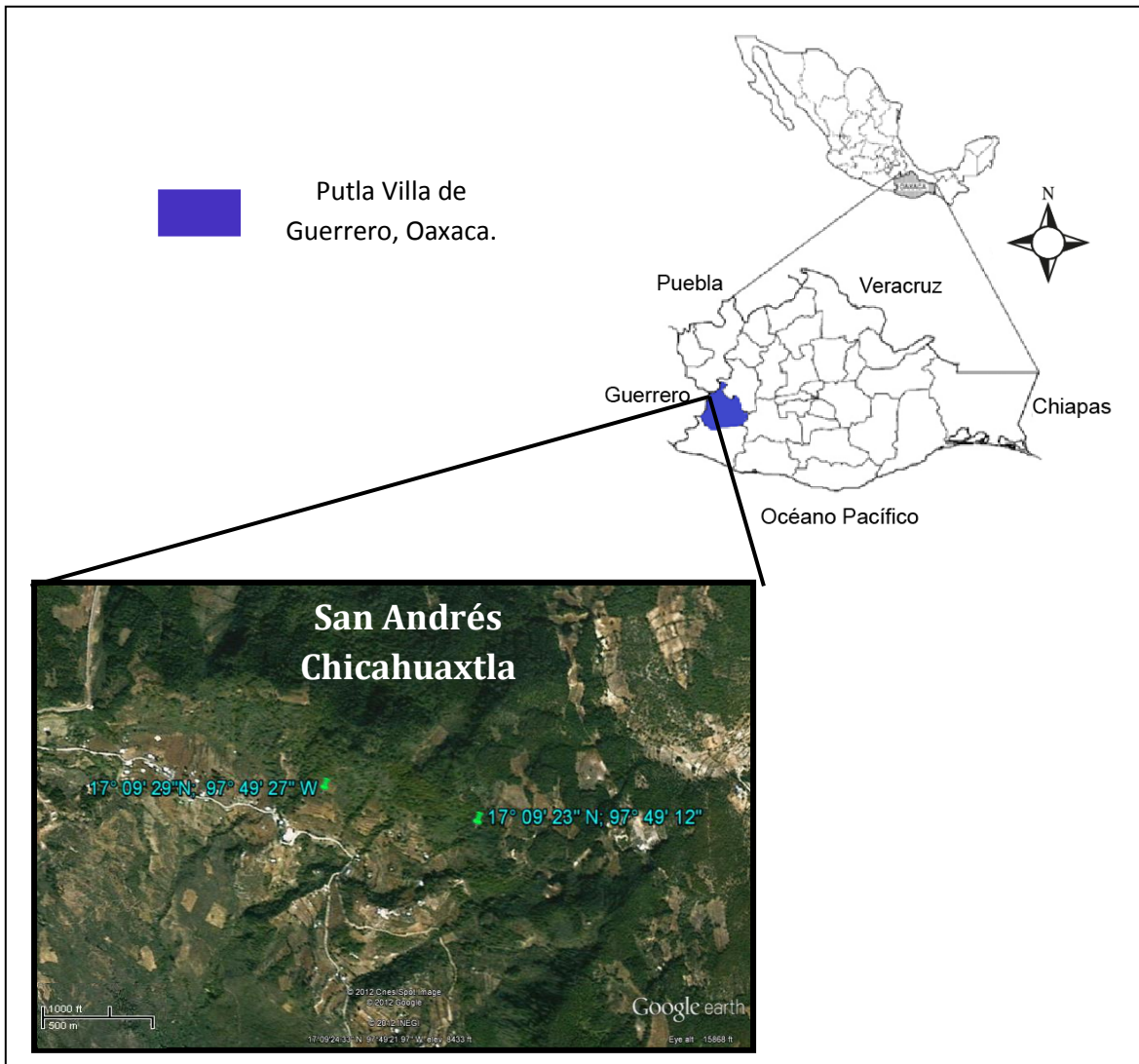


Figura 1. Mapa de la zona de estudio.

Se trata de un fragmento de vegetación de bosque mesófilo de montaña con un moderado a alto grado de conservación que tiene entre sus componentes dominantes a *Liquidambar styraciflua*, *Carpinus carolineana*, *Oareopanax xalapensis*. El área ocupada por el fragmento de bosque mesófilo de montaña es de aproximadamente 20 hectáreas. De acuerdo con la carta climática, se tiene una precipitación promedio de 1000-3000 mm, con una temperatura promedio de 12 °C a 18 °C. Los suelos que registra el INEGI son Luvisol, Cambisol, Regosol, Leptosol, Gleysol y Phaeozem.

## **VII. MATERIAL Y MÉTODOS**

### **7.1. FASE DE CAMPO**

#### **7.1.1. Selección de los sitios de muestreo**

Se hicieron recorridos por el área de estudio apoyados en el mapa topográfico del INEGI 1997. Se seleccionaron los cinco sitios más conservados del fragmento del bosque mesófilo de montaña, utilizando como criterios la estructura y composición de la comunidad, grado de perturbación, presencia y espesor del mantillo, ausencia de evidencias de erosión o de extracción de recursos del bosque. En cada sitio se describió la estructura de la vegetación, el perfil de suelo y se tomaron muestras de mantillo, de los horizontes genéticos del suelo mineral para su análisis físico y químico en el laboratorio y para describir la distribución del sistema radical.

#### **7.1.2. Muestreo de la vegetación**

Para describir la estructura de la vegetación, en cada sitio seleccionado se realizó un transecto de 2x50 m de acuerdo con Gentry (Ruiz, 2009). A lo largo del transecto, se cuantificó el número de especies e individuos de vegetación arbórea, arbustiva y herbácea y se midieron los siguientes parámetros ecológicos: para árboles, área basal, altura, cobertura y diámetro a la altura de pecho (DAP); para arbustos y herbáceas: especie, altura y cobertura. Para determinar la composición de la comunidad vegetal del área, se recolectaron y herborizaron especímenes de cada especie.

#### **7.1.3. Muestreo de mantillo**

En cada sitio de muestreo seleccionado se tomaron muestras compuestas de mantillo, integradas por cinco submuestras, cada una de las cuales procedió de la recolecta del mantillo de una superficie de 20x20 cm (Pizzani, 2005).

#### **7.1.4. Muestreo de suelo para su caracterización física y química**

Se realizó la apertura de un perfil de suelo en cada uno de los cinco sitios seleccionados y se georeferencio con un GPS Maguellan Map 330. El perfil se describió morfológicamente con base en Cuanalo de la Cerda (1990) e identificó utilizando la clave de la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (WRB) por sus siglas en ingles, (IUSS, 2007). Se tomaron muestras simples de dos kilogramos de cada uno de los horizontes genéticos encontrados, incluyéndose el 100% de pedregosidad, se colocaron en bolsas de plástico previamente etiquetadas y se trasladaron al laboratorio para su análisis físico y químico.

#### **7.1.5. Muestreo de raíces**

Un monolito de 20x20 cm de superficie y hasta la profundidad máxima donde se encontraba el 90% o más del sistema radical total, se muestreó cada 10 cm de espesor

(Fig. 1) Cada una de estas muestras fue colocada en bolsas de plástico incluyendo la pedregosidad (Aguilar *et al.*, 2006).

Las muestras de suelo con raíces fueron transportadas debidamente etiquetadas hasta una corriente de agua, donde se colocaron en un tamiz con luz de malla de 0.36 mm y lavadas a flujo continuo de agua a fin de separar el suelo fino del resto del material (arena, gravas y piedras) en el cual quedaron contenidas las raíces. Bajo estas condiciones se transportaron al laboratorio de restauración de suelos de la FES Zaragoza.

## **7.2. FASE DE LABORATORIO**

### **7.2.1. Análisis del mantillo**

Las muestras de mantillo se separaron en sus componentes (hojas, flores, frutos, ramas, corteza, humus y misceláneos), posteriormente, de cada una de las cinco muestras compuestas se hizo una submuestra proporcional de 100 g a partir de sus componentes, se pusieron a secar a la sombra, a temperatura ambiente durante 48 h, después fueron molidas hasta obtener una textura fina y se homogeneizaron para el análisis nutrimental que consistió en las siguientes determinaciones:

**Nitrógeno total**, se realizó con el método semimicro Kjeldahl. Este método comprende tres fases; 1) digestión de la muestra con ácido sulfúrico, para conservar las formas de nitrógeno amoniacal, que en medio ácido se encuentra como  $\text{NH}_4^+$ ; 2) destilación en presencia de hidróxido de sodio para formar amoniaco; 3) Valoración del amoniaco desprendido, mismo que es recogido en una solución de ácido bórico para reaccionar, titular con  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0.01N (INE, 2006).

**Fósforo total**, fue determinado con el extracto obtenido por digestión con  $\text{HClO}_4/\text{HNO}_3$  y se cuantificó por colorimetría (Valdés, 2010).

**Potasio y Hierro**, se obtuvo un extracto por digestión con  $\text{HClO}_4/\text{HNO}_3$  y posteriormente se cuantificaron con el espectrómetro de absorción atómica (Valdés, 2010).

**Sulfatos**, se determinó con el extracto de saturación por medio del método de turbidimetría (Diario Oficial de la Federación 2003-NOM-021-SEMARNAT-2000; Soriano, 2004).

### **7.2.2. Análisis de suelo**

Las muestras de suelos previamente secadas, molidas, tamizadas en una malla de 2 mm y homogeneizadas, fueron sometidas a un análisis físico y químico que consistió en las siguientes determinaciones:

**Color**, Se midió en seco y en húmedo (a capacidad de campo) comparando con cartas de colores estándar de Munsell (Ortiz, 2008).

**Retención de humedad**, 50 g de suelo fueron saturados con agua destilada se dejan drenar libremente durante 48 horas y se procedió a registrar su peso a la capacidad de campo, posteriormente se secaron en un horno a 105°C hasta peso constante y finalmente se pesaron. Calculando el contenido de agua con la siguiente fórmula (INE, 2006).

$$\% \text{ de H}_2\text{O a CC} = \frac{\text{peso del suelo a CC} - \text{peso del SSH} \times 100}{\text{peso del SSH}}$$

donde:

CC = Capacidad de campo

SSH = Suelo seco al horno

**Densidad aparente**, (DA) por el método del cilindro, que se fundamenta en el conocimiento de la masa exacta de suelo que está contenida en un volumen conocido conservando su estructura y composición de manera que se altere lo menos posible el espacio poroso que en campo existe (Forsythe, 1985; Llorca y Bautista, 2006).

**Densidad real**, por el método del picnómetro, la masa de partículas sólidas secas al horno se determinó al ser pesada y su volumen se calculó a partir de la masa de agua, que se desplaza por la muestra (Diario Oficial de la Federación 2003-NOM-021-SEMARNAT-2000; Soriano, 2004).

**Textura**, por el método del hidrómetro de Bouyoucos basado en la ley de Stoke (Bouyoucos, 1962), consiste en dos fases, la primera es la destrucción de la estructura del suelo mediante la oxidación de la materia orgánica con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y reemplazo de los cationes floculantes a través de la adición de los agentes dispersantes oxalato de sodio y metasilicato de sodio; la segunda consiste en la separación de las partículas por agitación mecánica, finalmente, se hizo la cuantificación de los componentes del suelo con el Bouyoucos aprovechando su sedimentación diferencial (Soriano 2004).

**pH**, por el método electrométrico en agua relación 1:2 (Jackson, 1982); consiste en reposar 10 g de suelo en 20 mL de agua, agitando cada 5 minutos, con lo cual los iones H<sup>+</sup> que están fácilmente disponibles van a pasar a la solución al lavar el suelo (INE, 2006). Posteriormente se midió el pH con un potenciómetro calibrado con dos soluciones amortiguadoras (pH 4 y pH 7), en virtud de que el pH de los suelos de la zona son ácidos (Rivera, 2010).

**Materia orgánica (MO)**, por el método de Wlackley-Black (1934) vía húmeda. Que se basa en la reducción del Cr:  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 + \text{H}_2\text{SO}_4 \text{ ----> K}_2\text{SO}_4 + \text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3 + 4\text{H}_2\text{O} + 3/2\text{O}_2$ ; una reacción parcial con un agente oxidante, considerando que la MO se comporta como un hidrato de carbono se tiene:  $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2 \text{ ----> } 6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$  y por último la valoración del exceso de oxidante con una sal ferrosa (Marín, 2002).

**Capacidad de intercambio catiónico**, se pesó suelo seco a temperatura ambiente, para posteriormente medir en el complejo de cambio el número de sitios de intercambio saturado con  $\text{CaCl}_2$  1N, pH =7, se retiró el exceso de Ca lixiviando con alcohol para posteriormente desplazar al ión Ca del complejo con NaCl y cuantificar el Ca del extracto por titulación con ácido etilendiaminotetraacético 0.02 N (Pérez, 1996).

**Conductividad eléctrica**, (CE) por medio de su extracto de saturación (Jackson, 1982); la determinación se basa en la ley de Ohm, que establece que la resistencia eléctrica de una solución es inversamente proporcional a su concentración de sales. Se realizó obteniendo la solución del suelo a partir de su punto de saturación y determinando la conductividad eléctrica del extracto con electrodos de constante (K) conocida y calculando la CE con la corrección de su temperatura en el momento de la determinación.

**Nitrógeno total**, se realizó con el método semimicro Kjeldahl. Este método comprende tres fases; 1) digestión de la muestra con ácido sulfúrico, para conservar las formas de nitrógeno amoniacal, que en medio ácido se encuentra como  $\text{NH}_4^+$ ; 2) destilación en presencia de hidróxido de sodio para formar amoniaco; 3) Valoración del amoniaco desprendido, mismo que es recogido en una solución de ácido bórico para reaccionar, titular con  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0.01N (INE, 2006).

**Fósforo soluble**, se utilizó el método de Bray Kurtz. Basado en la extracción de las formas de fósforo fácilmente solubles, principalmente fosfatos de calcio y una fracción de los fosfatos de aluminio y hierro, con la combinación de ácido clorhídrico y fluoruro de amonio, la cuantificación se lleva a cabo por colorimetría (INE, 2006).

**Potasio**, Se cuantificó con el espectrofotómetro de absorción atómica del extracto obtenido con acetato de amonio (Valdés, 2010).

**Sulfatos**, se determinó con el extracto de saturación por medio del método de turbidimetría (Diario Oficial de la Federación 2003-NOM-021-SEMARNAT-2000; Soriano, 2004).

**Hierro**, se extrajo con el método de Mehlich-3, con acetato de amonio y con el agente quelante EDTA, posteriormente se leyó en el espectrofotómetro de absorción atómica (Abreu, 2004).

### 7.2.3. Análisis del sistema radical.

Las raíces fueron separadas de este material, utilizando pinzas y un estereoscopio. Las raíces se clasificaron en cinco grupos diamétricos: raíces extremadamente finas (menores a 0.5 mm), raíces muy finas (0.5 – 1.0 mm), finas (1.0-2.0 mm), gruesas (2.0– 3.0 mm) y muy gruesas (mayores de 3.0 mm).

El análisis físico y químico de las muestras consistió en la determinación de los siguientes parámetros:

**Biomasa seca**, las raíces de cada clase diamétrica fueron colocadas en bolsas de papel de estraza, previamente etiquetadas, las bolsas con las raíces se introdujeron en un horno a 70 °C hasta peso constante. Bajo estas condiciones las raíces de cada clase diamétrica se pesaron en una balanza analítica con precisión de 0.0001g a fin de conocer su biomasa seca. 0.5 g de raíces de cada clase diamétrica se pesaron y de estas se midió su diámetro y longitud, con el fin de calcular el área de superficie expuesta, el dato obtenido se multiplicó por la biomasa total de raíces de cada diámetro.

**Diámetro**, fue medido con un tornillo micrométrico con precisión de 0.01 mm para su mayor exactitud, separando las raíces con pinzas.

**Longitud**, este parámetro se midió con un vernier digital.

**Área de superficie radical**, con los datos obtenidos de la biomasa, diámetro y longitud radical, se calculará el área de superficie total del sistema radical con la fórmula:

$$A = L \cdot P / V$$

donde:

V= volumen del monolito

L=longitud total de las raíces

P= peso total de las raíces

El análisis nutrimental de la raíz consistió en los métodos antes mencionados en el análisis de mantillo.

### **7.3. FASE DE GABINETE**

#### **7.3.1. Determinación del material vegetal**

Cada uno de los especímenes recolectados se determinó con claves taxonómicas bajo la asesoría de personal especializado del Herbario FEZA y cotejados con las colecciones científicas del herbario MEXU. La ortografía correcta de los nombres científicos se hará consultando el índice Internacional de Nombres de las Plantas, IPNI por sus siglas en inglés. Con los datos obtenidos durante el muestreo de vegetación fue calculado el índice de valor de importancia (IVI), utilizando las siguientes ecuaciones:

**Densidad absoluta**= número de individuos / unidad de área.

**Densidad relativa**= densidad absoluta de una especie/el número total de individuos x 100.

**Dominancia absoluta**=Superficie que ocupa la copa la especie ( $A=\pi r^2$ ).

**Dominancia relativa**= dominancia absoluta de una especie/suma total de la dominancia absoluta x 100.

**Frecuencia absoluta**= número de veces que se observo la especie en un determinado número de unidades de muestreo.

**Frecuencia relativa**= frecuencia absoluta de una especie/entre la suma total de la frecuencia absoluta x 100.

### **Valor de importancia**

$$IVI = \text{Densidad relativa} + \text{Cobertura relativa} + \text{Frecuencia relativa}$$

Se calculó el índice de Simpson se uso para ver la representatividad de las especies con mayor valor de importancia.

$$\lambda = \sum p_i^2$$

De igual forma se calculó el índice de Shannon-Wiener para observar la uniformidad que presenta la comunidad vegetal.

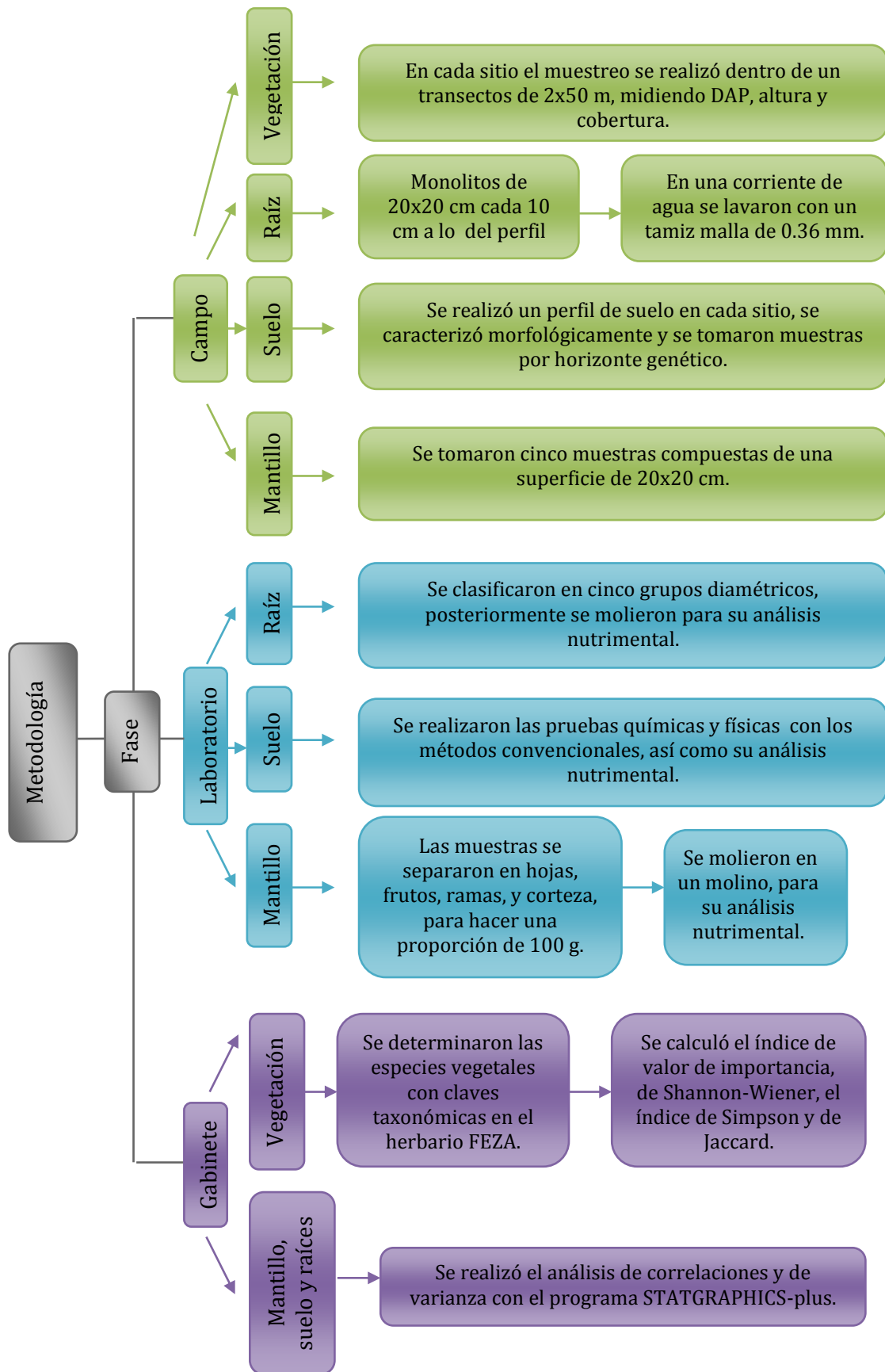
$$H' = -\sum p_i \ln p_i$$

donde:

$p_i$  = abundancia proporcional de la especie  $i$ , es decir, el número de individuos de la especie  $i$  dividido entre el número total de individuos de la muestra.

### **7.3.2. Análisis estadístico**

Por último se realizaron análisis de varianza y correlaciones entre las propiedades del suelo y los parámetros biológicos, así como con los nutrimentos estudiados con ayuda del programa STATGRAPHICS-Plus 5.0.



Cuadro 1. Diagrama de flujo de la metodología.



## VIII. RESULTADOS

### 8.1. CARACTERIZACIÓN DE LA VEGETACIÓN

Para el fragmento del bosque mesófilo de montaña (BMM) estudiado, que se encuentra en la comunidad de San Andrés Chicahuaxtla, municipio de Putla Villa de Guerrero, Oaxaca, se obtuvo un total de 446 individuos en un área de 500 m<sup>2</sup>, de los cuales el 83.7% fue identificado encontrándose 45 familias, 58 géneros y 65 especies. El 16.3% no pudo ser identificado taxonómicamente debido a la falta de flores y frutos.

De acuerdo con el índice de valor de importancia (IVI) se observó que las especies con un alto valor pertenecen al estrato arbóreo. En el Cuadro 2 aparece el listado florístico de las 20 especies con los más altos valores de importancia, entre los que se encuentra: *Quercus laurina* Humbl. y Bonpl., *Trichilia havanensis* Jacq., *Oreophanax xalapensis* (H.B.K) Dence y Planchon y *Symplocos sousae* Almeda con un 36.07, 3.75, 3.37 y 2.76% respectivamente. Las especies identificadas suman el 89.6% de IVI del BMM, mientras que las no identificadas cuentan con el 10.4%.

**Cuadro 2. Especies dominantes del bosque mesófilo de montaña de San Andrés Chicahuaxtla.**

Familia	Género	Especie	DR*	DR	FR	IVI	% IVI
Fagaceae	<i>Quercus</i>	<i>laurina</i> Humbl. y Bonpl.	0.0995	0.925673	0.0568	1.0820	36.07
Meliaceae	<i>Trichilia</i>	<i>havanensis</i> Jacq.	0.0611	0.000183	0.0511	0.1124	3.75
Araliaceae	<i>Oreophanax</i>	<i>xalapensis</i> (H.B.K) Dence y Planchon	0.0633	0.003511	0.0341	0.1010	3.37
Symplocaceae	<i>Symplocos</i>	<i>sousae</i> Almeda.	0.0000	0.000191	0.0284	0.0829	2.76
Lamiaceae	<i>Salvia</i>	<i>lasiocephala</i> Hook. y Arn.	0.0498	0.005339	0.0170	0.0722	2.41
Caprifoliaceae	<i>Viburnum</i>	<i>jucundum</i> var. <i>detractum</i> (Standl. y Steyrem.) D.	0.0339	0.001562	0.0284	0.0639	2.13
Arbol sp.							
Actinidiaceae	<i>Saurauia</i>	<i>villosa</i> DC	0.0249	0.011822	0.0227	0.0594	1.98
ND	ND	ND	0.0249	0.008332	0.0114	0.0446	1.49
Rosaceae	ND	ND	0.0249	0.000067	0.0170	0.0420	1.40
Styracaceae	<i>Styrax</i>	<i>argenteus</i> var. <i>ramirezii</i> Greenm.	0.0181	0.000317	0.0227	0.0411	1.37
Aspleniaceae	<i>Asplenium</i>	<i>monanthes</i> Linneanus	0.0294	0.000008	0.0114	0.0408	1.36
Styracaceae	<i>Styrax</i>	<i>ramirezii</i> Greenm.	0.0271	0.000044	0.0114	0.0386	1.29
Melastomataceae	ND	ND	0.0204	0.000331	0.0170	0.0377	1.26
Theaceae	<i>Ternstroemia</i>	<i>silvatica</i> Schlecht et. Cham.	0.0136	0.000207	0.0227	0.0365	1.22
Euphorbiaceae	<i>Croton</i>	<i>morifolius</i>	0.0136	0.000019	0.0227	0.0363	1.21
Rutaceae	<i>Zanthoxylum</i>	<i>williamsii</i> Standl.	0.0136	0.000010	0.0227	0.0363	1.21
Myrsinaceae	ND	ND	0.0181	0.000109	0.0170	0.0353	1.18
Adiantaceae	<i>Adiantum</i>	<i>andicola</i> Liebmann	0.0181	0.000003	0.0170	0.0351	1.17
Arbol sp.	ND	ND	0.0158	0.001069	0.0170	0.0340	1.13

DR\*= densidad relativa. DR= dominancia relativa. FR= frecuencia relativa. IVI= índice de valor de importancia. ND= no determinadas

Las familias con un mayor número de especies son Asteraceae, Solanaceae, Rubiaceae, Aspleniaceae, y Polypodiaceae (Cuadro 3). Sin embargo, ninguna de éstas cuentan con un IVI alto, en contraste las familias, Meliaceae, Araliaceae y

Symplocaceae con un número menor de especies tienen un valor de importancia superior.

**Cuadro 3. Número de especies por Familias encontradas en el BMM.**

Familia	N spp.	N spp.	N spp.	Familia	N spp.	Familia	N spp.
Acanthaceae	2	Caprifoliaceae	1	Meliaceae	1	Rutaceae	1
Actinidiaceae	1	Clethraceae	2	Myrcinaceae	2	Smilacaceae	1
Adiantaceae	2	Cyperaceae	1	Myrtaceae	1	Solanaceae	7
Anacardiaceae	2	Ericaceae	2	Onagraceae	2	Styracaceae	2
Apiaceae	1	Euphorbiaceae	2	Orchidaceae	1	Symplocaceae	1
Aquifoliaceae	1	Fabaceae	1	Poaceae	1	Theaceae	2
Araliaceae	1	Fagaceae	2	Polygalaceae	1	Thelypteridaceae	1
Asclepiadaceae	1	Flacourtiaceae	1	Polypodiaceae	3	Ulmaceae	1
Aspleniaceae	3	Lamiaceae	2	Proteaceae	2	Verbenaceae	1
Asteraceae	9	Loganiaceae	1	Rhamnaceae	1	ND	5
Blechnaceae	1	Malvaceae	1	Rosaceae	1		
Capparaceae	1	Melastomataceae	2	Rubiaceae	5		

ND = no determinadas

De acuerdo al índice de Simpson los valores cercanos a 1 indican fuerte dominancia y baja diversidad, el Índice de Shannon-Wiener señala que entre más alto sea el valor, la diversidad será mayor, conforme a lo anterior se observa que el transecto tres presenta una alta diversidad, en tanto, el quinto es el menos diverso (Cuadro 4), indicando que la distribución de las especies dentro del bosque es equitativa, la cual también es observada en el número de especies que muestra cada transecto.

Por otra parte el área total del BMM, muestra valores bajos en el Índice de Simpson, esto indica que tiene una alta diversidad de especies, en cuanto al índice de Shannon-Waver se obtuvieron valores cercanos a cuatro indicando alta riqueza de especies.

**Cuadro 4. Índices de Equidad (H') y Dominancia ( $\lambda(\ln)$ ) entre los transectos muestreados.**

Transecto	No. de individuos	No. de especies	Índice de Shannon-Wiener Índice de Simpson	
			H'	$\lambda(\ln)$
1	64	25	2.904	0.081
2	141	26	3.130	0.066
3	110	24	3.168	0.051
4	64	19	2.837	0.081
5	67	16	2.703	0.084
<b>Total</b>	<b>446</b>	<b>65</b>	<b>3.892</b>	<b>0.033</b>

Con el fin de observar que tan similares son los sitios estudiados se calculó el índice de Jaccard, este índice mostró que comparten menos del 20% del total de especies (cuadro 5). Por otra parte las especies que se encontraron en la mayoría de los sitios son *Asplenium monanthes*, *Trichilia havanensis* y *Zeugites latifolia*.

**Cuadro 5. Porcentaje de similitud de las especies vegetales en un fragmento de BMM.**

<b>Transecto</b>	<b>Especies en común</b>	<b>Índice de Jaccard <math>I_j</math> (%)</b>	<b>Transecto</b>	<b>Especies en común</b>	<b>Índice de Jaccard <math>I_j</math> (%)</b>
<b>T1-T2</b>	8	11.94	<b>T2-T4</b>	12	17.91
<b>T1-T3</b>	8	12.70	<b>T2-T5</b>	7	12.50
<b>T1-T4</b>	7	12.50	<b>T3-T4</b>	8	11.94
<b>T1-T5</b>	5	9.62	<b>T3-T5</b>	5	8.33
<b>T2-T3</b>	10	14.49	<b>T4-T5</b>	8	14.04

## **8.2. DESCRIPCIÓN MORFOLÓGICA DE LOS PERFILES DE SUELO**

En este estudio se realizaron cinco perfiles de suelo en el BMM donde se encontraron suelos profundos, con buen drenaje y alta pedregosidad, también cuentan con una capa de mantillo u horizonte orgánico el cual protege al suelo de la erosión.

Cuadro 6. Caracterización ecológica del sitio y descripción morfológica del suelo.

<b>Localidad:</b>	<b>San Andrés Chicahuaxtla, Putla Villa de Guerrero, Oaxaca.</b>
<b>Ubicación:</b>	17° 09' 29" N 97° 39' 27" W
<b>Altitud:</b>	2579 m
<b>Fecha de muestreo:</b>	11/Junio/2010
<b>Pendiente:</b>	27°
<b>Forma de la pendiente</b>	Convexa-concava
<b>Drenaje Superficial:</b>	Sitio normal
<b>Drenaje Interno:</b>	Suelo bien drenado
<b>Material Original:</b>	Granito (riolita)
<b>Origen del Suelo:</b>	<i>In situ</i>
<b>Permeabilidad:</b>	Rápida
<b>Erosión:</b>	Moderada
<b>Uso Actual:</b>	Forestal
<b>Vegetación:</b>	Bosque mesófilo de montaña
<b>Microrelieve</b>	Presencia de veredas y madrigueras de fauna silvestre
<b>Superficie del suelo</b>	Cubierta 100% por mantillo, 86% por vegetación y descubierto 4%.
<b>Tipo de Suelo:</b>	Cambisol
<b>Horizonte de diagnóstico:</b>	Epipedón Úmbrico Endopedon: Árgico



Figura 2. Perfil de un Cambisol en el que se muestra el monolito formado por la toma de muestra para el análisis del sistema radical.

**Cuadro 6. (Continuación)**

<b>Horizonte</b>	<b>Profundidad (cm)</b>	<b>Descripción</b>
<b>Oi</b>	<b>7-5</b>	Capa de hojarasca relativamente fresca, no fragmentada. Formada por hojas, ramas, tallos, fragmentos de corteza y material aportado por herbáceas, se reconoce la especie de origen, esta capa no es continua.
<b>Oe</b>	<b>5-3</b>	Predominan residuos vegetales fragmentados, cuya especie se reconocería mediante un estudio cuidadoso.
<b>Oa</b>	<b>3-0</b>	Materia orgánica profundamente transformada, no identificable (humus). Los residuos fragmentados generalmente no se observan. Presenta un color pardo típico.
<b>A1</b>	<b>0-10</b>	El límite a A2 es irregular; color en seco 10YR 2/2 (pardo muy oscuro), color en húmedo 10YR 2/1 (negro), textura areno-migajonoso, pH en H <sub>2</sub> O 4.86, en KCl 4.2; pedregosidad de 15%, tamaño medio y subangulares; estructura poliédrica subangular bien desarrollada de consistencia ligeramente dura, en húmedo friable y cuando muy húmedo ligeramente pegajoso y plástico; poros numerosos desde micro hasta finos continuos, intersticiales, macroporos tubulares de orientación oblicua entre y dentro de los agregados, permeabilidad rápida; abundantes raíces finas a delgadas, pocas son gruesas de 10 a 13 cm.
<b>A2</b>	<b>10-35</b>	Este horizonte tiene límite a B1 irregular, el suelo esta húmedo; color en seco 10YR 6/3 (pardo claro), en húmedo 10YR 4/2 (pardo oscuro grisáceo); textura migajón arcillo-arenoso, pH en H <sub>2</sub> O 4.62, en KCl 4.09; pedregosidad de 15% de tamaño medio, angulares y subangulares, estructura poliédrica subangular bien desarrollada; consistencia ligeramente dura en seco, friable en húmedo y cuando muy húmedo pegajoso y plástico; numerosos poros desde micro a finos continuos de orientación caótica entre y dentro de los agregados, los macroporos son tubulares oblicuos y verticales; raíces comunes finas a medias de hasta 10 mm.
<b>B1</b>	<b>35-65</b>	La transición de este horizonte a B2 es irregular, color en seco 10YR 6/2 (pardo claro grisáceo), en húmedo 10YR 4/3 (pardo oscuro); textura migajón arenoso, pH en H <sub>2</sub> O 4.65, en KCl 3.89; pedregosidad de 20% rocas angulares y subangulares desde pequeñas a grandes; la estructura poliédrica bien desarrollada de consistencia dura en seco, firme en húmedo y cuando muy húmedo es pegajoso y plástico; micro y macroporos frecuentes continuos y de orientación caótica dentro y entre los agregados, los macroporos son tubulares oblicuos y verticales de hasta 1 mm y las raíces finas a medias son comunes de 10-20 por 3 dm <sup>2</sup> .
<b>B2</b>	<b>65-107</b>	La transición de este horizonte a C es irregular, color en seco 10YR 7/2 (gris claro), en húmedo 10YR 3/4 (pardo amarillento oscuro); textura migajón arenoso, pH en H <sub>2</sub> O 4.68, en KCl 4.1; pedregosidad de 40%, rocas grandes de hasta 25 cm de diámetro, angulares, estructura bien desarrollada, consistencia dura en seco y cuando húmedo firme cuando muy húmedo es plástico y pegajoso, poros frecuentes continuos y de orientación caótica; pocas raíces medias a gruesas.
<b>C</b>	<b>107-110</b>	Color en seco 10YR 7/3 (pardo muy pálido), en húmedo 10YR 6/4 (pardo claro amarillento); textura migajón arenoso, pH en H <sub>2</sub> O 4.23, en KCl 3.73; pedregosidad de 40%, rocas grandes de hasta 25 cm de diámetro, angulares, estructura bien desarrollada, consistencia dura en seco y cuando húmedo firme cuando muy húmedo es plástico y pegajoso, poros frecuentes continuos y de orientación caótica; pocas raíces medias a gruesas.

Cuadro 7. Caracterización ecológica del sitio y descripción morfológica del suelo.

<b>Localidad:</b>	<b>San Andrés Chicahuaxtla, Putla Villa de Guerrero, Oaxaca.</b>
<b>Ubicación:</b>	17° 09' 38" N 97° 49' 30" O
<b>Altitud:</b>	2644 m
<b>Fecha de muestreo:</b>	30/Junio/10
<b>Pendiente:</b>	8°
<b>Forma de la pendiente</b>	Regular convexa
<b>Drenaje Superficial:</b>	Sitio normal
<b>Drenaje Interno:</b>	Suelo bien drenado
<b>Material Original:</b>	Granito (riolita)
<b>Origen del Suelo:</b>	In situ
<b>Permeabilidad:</b>	Rápida
<b>Erosión:</b>	Moderada
<b>Uso Actual:</b>	Forestal
<b>Vegetación:</b>	Bosque mesófilo de montaña
<b>Microrelieve</b>	Presencia de veredas y madrigueras de fauna silvestre
<b>Superficie del suelo</b>	Cubierta 100% por mantillo, 80% por vegetación y descubierto 5% y 15%
<b>Tipo de Suelo:</b>	Cambisol
<b>Horizonte de diagnóstico:</b>	Epipedón Úmbrico Endopedón árgico



Figura 3. Perfil de un Cambisol.

**Cuadro 7. (Continuación)**

<b>Horizonte</b>	<b>Profundidad (cm)</b>	<b>Descripción</b>
<b>Oi</b>	<b>9-5.5</b>	Capa de hojarasca relativamente fresca, no fragmentada. Formada por hojas, ramas, tallos, fragmentos de corteza y material aportado por herbáceas, se reconoce la especie de origen, esta capa no es continua.
<b>Oe</b>	<b>5.5-3</b>	Predominan residuos vegetales fragmentados, cuya especie se reconocería mediante un estudio cuidadoso.
<b>Oa</b>	<b>3-0</b>	Materia orgánica profundamente transformada, no identificable (humus). Los residuos fragmentados generalmente no se observan. Presenta un color pardo típico.
<b>A1</b>	<b>0-30</b>	El límite a A2 es irregular; color en seco 7.5YR 4/3 (pardo oscuro), color en húmedo 7.5YR 3/2 (pardo oscuro), textura migajón-arenosa, pH en H <sub>2</sub> O 5.08, en KCl 3.84; pedregosidad de 2%, rocas pequeñas y subangulares; estructura poliédrica subangular moderadamente desarrollada de consistencia ligeramente dura, en húmedo friable y cuando muy húmedo pegajoso y plástico; numerosos poros desde micro hasta finos continuos, de orientación oblicua y dentro de los agregados, macroporos tubulares, permeabilidad rápida; abundantes raíces finas a delgadas, pocas gruesas.
<b>A2</b>	<b>30-60</b>	Este espesor de suelo tiene límite a B1 regular ondulado, el suelo es húmedo; color en seco 7.5YR 5/3 (pardo), en húmedo 7.5YR 4/4 (pardo oscuro); textura migajón-arenosa, pH en H <sub>2</sub> O 5.70, en KCl 4.33; pedregosidad de 8% de tamaño medio y subangulares, estructura poliédrica subangular moderadamente desarrollada; consistencia ligeramente dura en seco, friable en húmedo y cuando muy húmedo pegajoso y plástico; numerosos poros desde micro a finos continuos de orientación caótica dentro de los agregados, los macroporos son tubulares oblicuos; abundantes raíces finas a delgadas.
<b>A3</b>	<b>60-90</b>	La transición de esta capa a B es irregular, color en seco 7.5YR 6/4 (pardo claro), en húmedo 7.5YR 4/4 (pardo oscuro); textura arena-migajonosa, pH en H <sub>2</sub> O 5.10, en KCl 3.53; pedregosidad de 25% rocas subangulares desde pequeñas a grandes; la estructura poliédrica débilmente desarrollada de consistencia blanda en seco, ligeramente friable en húmedo y cuando muy húmedo no es pegajoso; micro y macroporos frecuentes continuos y de orientación caótica dentro de los agregados, los macroporos son tubulares y las raíces comunes de finas a medias.
<b>B</b>	<b>90-130</b>	La transición con C es irregular, color en seco 7.5YR 6/4 (pardo claro), en húmedo 7.5YR 3/4 (pardo oscuro); textura migajón-arenosa, pH en H <sub>2</sub> O 3.44, en KCl 3.41; pedregosidad de 15% de rocas pequeñas hasta medianas subangulares, estructura débilmente desarrollada, consistencia blanda en seco y cuando húmedo no es pegajoso, poros frecuentes continuos y de orientación caótica; muy pocas raíces de finas a medias.

Cuadro 8. Caracterización ecológica del sitio y descripción morfológica del suelo.

<b>Localidad:</b>	<b>San Andrés Chicahuaxtla, Putla Villa de Guerrero, Oaxaca.</b>
<b>Ubicación:</b>	17° 09' 35.5"N 97° 49' 40.5"O
<b>Altitud:</b>	2534 m
<b>Fecha de muestreo:</b>	9/Septiembre/2010
<b>Pendiente:</b>	5°
<b>Forma de la pendiente</b>	Convexa-concava
<b>Drenaje Superficial:</b>	Sitio normal
<b>Drenaje Interno:</b>	Suelo bien drenado
<b>Material Original:</b>	Granito (riolita)
<b>Origen del Suelo:</b>	<i>In situ</i>
<b>Permeabilidad:</b>	Rápida
<b>Erosión:</b>	Moderada
<b>Uso Actual:</b>	Forestal
<b>Vegetación:</b>	Bosque mesófilo de montaña
<b>Microrelieve</b>	Presencia de veredas y madrigueras de fauna silvestre
<b>Superficie del suelo</b>	Cubierta 100% por mantillo, 79% por vegetación y descubierto 4%.
<b>Tipo de Suelo:</b>	Cambisol
<b>Horizonte de diagnóstico:</b>	Epipedón Nítrico Endopedon: Árgico



Figura 4. Perfil de un Cambisol en el que se muestra el monolito formado por la toma de muestra para el análisis del sistema radical.



**Cuadro 8. (Continuación)**

<b>Horizonte</b>	<b>Profundidad (cm)</b>	<b>Descripción</b>
Oi	<b>10-5</b>	Capa de hojarasca relativamente fresca, no fragmentada. Formada por hojas, ramas, tallos, fragmentos de corteza y material aportado por herbáceas, se reconoce la especie de origen, esta capa no es continua.
Oe	<b>5-3</b>	Predominan residuos vegetales fragmentados, cuya especie se reconocería mediante un estudio cuidadoso.
Oa	<b>3-0</b>	Materia orgánica profundamente transformada, no identificable (humus). Los residuos fragmentados generalmente no se observan. Presenta un color pardo típico.
A1	<b>0-30</b>	El límite a A2 es irregular; color en seco 10YR 4/1 (gris oscuro), color en húmedo 10YR 2/2 (pardo muy oscuro), textura migajón, pH en H <sub>2</sub> O 4.27, en KCl 3.67; pedregosidad de 5%, tamaño pequeño y subangulares; estructura poliédrica subangular bien desarrollada de consistencia ligeramente dura en seco, en húmedo firme y cuando muy húmedo pegajoso y plástico; poros numerosos desde micro hasta finos continuos, intersticiales, macroporos tubulares de orientación oblicua entre y dentro de los agregados, permeabilidad rápida; abundantes raíces finas a delgadas, pocas son gruesas de 10 a 13 cm.
A2	<b>30-60</b>	Este horizonte tiene límite a B1 irregular; color en seco 10YR 6/3 (pardo claro), en húmedo 10YR 4/3 (pardo oscuro); textura migajón arcillo-arenoso, pH en H <sub>2</sub> O 4.38, en KCl 3.82; pedregosidad de 3% de tamaño medio, angulares y subangulares, estructura poliédrica subangular bien desarrollada; consistencia ligeramente dura en seco, friable en húmedo y cuando muy húmedo pegajoso y plástico; numerosos poros desde micro a finos continuos de orientación caótica entre y dentro de los agregados, los macroporos son tubulares oblicuos y verticales; raíces comunes finas a medias de hasta 10 mm.
B1	<b>60-90</b>	La transición de este horizonte a B2 es irregular, color en seco 10YR 7/3 (pardo muy claro), en húmedo 10YR 6/4 (pardo claro amarillento); textura migajón arcillo-arenoso, pH en H <sub>2</sub> O 4.63, en KCl 3.64; pedregosidad de 2% rocas angulares y subangulares de tamaño medio; la estructura poliédrica bien desarrollada de consistencia dura en seco, friable en húmedo y cuando muy húmedo es pegajoso y plástico; micro y macroporos frecuentes continuos y de orientación caótica dentro y entre los agregados, los macroporos son tubulares oblicuos y verticales de hasta 1 mm y las raíces finas a medias son comunes de 10-20 por 3 dm <sup>-2</sup> .
B2	<b>90-120</b>	La transición de este horizonte a C es irregular, color en seco 10YR 7/3 (pardo muy claro), en húmedo 10YR 5/4 (pardo amarillento); textura migajón arenoso, pH en H <sub>2</sub> O 4.25, en KCl 3.56; pedregosidad de 4% pequeñas y angulares, estructura bien desarrollada, consistencia dura en seco y cuando húmedo firme cuando muy húmedo es plástico y pegajoso, poros frecuentes continuos y de orientación caótica; pocas raíces medias a gruesas.
C	<b>120-150</b>	Color en seco 10YR 8/2 (blanco), en húmedo 10YR 6/6 (pardo amarillento); textura migajón arenoso, pH en H <sub>2</sub> O 4.24, en KCl 3.8; pedregosidad de 40%, rocas grandes de hasta 25 cm de diámetro, angulares, estructura bien desarrollada, consistencia dura en seco y cuando húmedo firme cuando muy húmedo es plástico y pegajoso, poros frecuentes continuos y de orientación caótica; pocas raíces medias a gruesas.

**Cuadro 9. Caracterización ecológica del sitio y descripción morfológica del suelo.**

<b>Localidad:</b>	<b>San Andrés Chicahuaxtla, Putla Villa de Guerrero, Oaxaca.</b>
<b>Ubicación:</b>	17° 9' 29" N 97° 49' 16" O
<b>Altitud:</b>	2484 m
<b>Fecha de muestreo:</b>	5/Noviembre/2010
<b>Pendiente:</b>	35°
<b>Forma de la pendiente</b>	Regular
<b>Drenaje Superficial:</b>	Sitio normal
<b>Drenaje Interno:</b>	Suelo bien drenado
<b>Material Original:</b>	Granito (riolita)
<b>Origen del Suelo:</b>	<i>In situ</i>
<b>Permeabilidad:</b>	Rápida
<b>Erosión:</b>	Moderada
<b>Uso Actual:</b>	Forestal
<b>Vegetación:</b>	Bosque mesófilo de montaña
<b>Microrelieve</b>	Presencia de veredas y Madrigueras de fauna silvestre
<b>Superficie del suelo</b>	Cubierta 100% por mantillo, 79% por vegetación y descubierto 4%.
<b>Tipo de Suelo:</b>	Regosol
<b>Horizonte de diagnóstico:</b>	Epipedón Mólico Endopedon:

**Cuadro 9. (Continuación)**

<b>Horizonte</b>	<b>Profundidad (cm)</b>	<b>Descripción</b>
Oi	<b>5-3</b>	Capa de hojarasca relativamente fresca, no fragmentada y usualmente de color. Formada por hojas, ramas, tallos, fragmentos de corteza y material aportado por herbáceas, se reconoce la especie de origen, esta capa no es continua.
Oe	<b>3-1</b>	Predominan residuos vegetales fragmentados, cuya especie se reconocería mediante un estudio cuidadoso.
Oa	<b>1-0</b>	Materia orgánica profundamente transformada, no identificable (humus). Los residuos fragmentados generalmente no se observan. Presenta un color pardo típico.
A1	<b>0-30</b>	El límite a C1 es irregular; color en seco 5YR 2.5/2 (pardo oscuro), color en húmedo 5YR 2.5/1 (negro), textura migajón arenoso, pH en H <sub>2</sub> O 6.51, en KCl 5.67; pedregosidad de 50%, tamaño medio angulares y subangulares; estructura poliédrica subangular bien desarrollada de consistencia blanda en seco, en húmedo muy friable y cuando muy húmedo no pegajoso y no plástico; poros numerosos desde micro hasta finos continuos, intersticiales, macroporos tubulares de orientación oblicua entre y dentro de los agregados, permeabilidad rápida; abundantes raíces finas a delgadas, pocas son gruesas de 10 a 13 cm.
C1	<b>30-70</b>	Este horizonte tiene límite a C2 irregular; color en seco 5YR 4/3 (pardo rojizo), en húmedo 5YR 3/2 (pardo rojizo); textura migajón arenoso, pH en H <sub>2</sub> O 6.46, en KCl 5.01; pedregosidad de 50% de tamaño medio y muy grandes, angulares y subangulares, estructura poliédrica subangular bien desarrollada; consistencia blanda en seco, muy friable en húmedo y cuando muy húmedo no pegajoso y no plástico; numerosos poros desde micro a finos continuos de orientación caótica entre y dentro de los agregados, los macroporos son tubulares oblicuos y verticales; raíces comunes finas a medias de hasta 10 mm.
C2	<b>70-100</b>	Color en seco 5YR 4/3 (pardo rojizo), en húmedo 5YR 3/3 (pardo rojizo); textura migajón arenoso, pH en H <sub>2</sub> O 6.24, en KCl 5.15; pedregosidad de 75 % rocas angulares y subangulares muy grandes; la estructura poliédrica bien desarrollada de consistencia ligeramente dura en seco, muy friable en húmedo y cuando muy húmedo es ligeramente pegajoso y no plástico; micro y macroporos frecuentes continuos y de orientación caótica dentro y entre los agregados, los macroporos son tubulares oblicuos y verticales de hasta 1 mm y las raíces finas a medias son comunes de 10-20 por 3 dm <sup>-2</sup> .

Cuadro 10. Caracterización ecológica del sitio y descripción morfológica del suelo.

<b>Localidad:</b>	<b>San Andrés Chicahuaxtla, Putla Villa de Guerrero, Oaxaca.</b>
<b>Ubicación:</b>	17° 09' 41" N 97° 49' 35" O
<b>Altitud:</b>	2659 m
<b>Fecha de muestreo:</b>	24/Febrero/2011
<b>Pendiente:</b>	4 %
<b>Forma de la pendiente</b>	Convexa-cóncava
<b>Drenaje Superficial:</b>	Sitio normal
<b>Drenaje Interno:</b>	Suelo bien drenado
<b>Material Original:</b>	Granito (riolita)
<b>Origen del Suelo:</b>	<i>In situ</i>
<b>Permeabilidad:</b>	Rápida
<b>Erosión:</b>	Moderada
<b>Uso Actual:</b>	Forestal
<b>Vegetación:</b>	Bosque mesófilo de montaña
<b>Microrelieve</b>	Presencia de veredas y Madrigueras de fauna silvestre
<b>Superficie del suelo</b>	Cubierta 100% por mantillo, 79% por vegetación y descubierto 4%.
<b>Tipo de Suelo:</b>	Leptosol
<b>Horizonte de diagnóstico:</b>	Epipedón Úmbrico Endopedon



Figura 5. Perfil de un Leptosol en el que se muestra el monolito formado por la toma de muestra para el análisis del sistema radical.

**Cuadro 10. (Continuación)**

<b>Horizonte</b>	<b>Profundidad (cm)</b>	<b>Descripción</b>
<b>Oi</b>	<b>7-5</b>	Capa de hojarasca relativamente fresca, no fragmentada. Formada por hojas, ramas, tallos, fragmentos de corteza y material aportado por herbáceas, se reconoce la especie de origen, esta capa no es continua.
<b>Oe</b>	<b>5-3</b>	Predominan residuos vegetales fragmentados, cuya especie se reconocería mediante un estudio cuidadoso.
<b>Oa</b>	<b>3-0</b>	Materia orgánica profundamente transformada, no identificable (humus). Los residuos fragmentados generalmente no se observan. Presenta un color pardo típico.
<b>A1</b>	<b>0-20</b>	El límite a A2 es irregular; color en seco 5YR 2.5/2 (pardo rojizo oscuro), color en húmedo 5YR 2.5/1 (negro), textura migajón arenoso, pH en H <sub>2</sub> O 4.97, en KCl 4.53; pedregosidad de 25%, tamaño medio y subangulares; estructura poliédrica subangular bien desarrollada, de consistencia blanda en seco, en húmedo muy friable y cuando muy húmedo no pegajoso y no plástico; poros numerosos desde micro hasta finos continuos, intersticiales, macroporos tubulares de orientación oblicua entre y dentro de los agregados, permeabilidad rápida; abundantes raíces finas a delgadas, pocas son gruesas de 10 a 13 cm.
<b>A2</b>	<b>20-50</b>	Este horizonte tiene límite a B1 irregular; color en seco 5YR 3/2 (pardo oscuro rojizo), en húmedo 5YR 2.5/2 (pardo rojizo oscuro); textura migajón arenoso, pH en H <sub>2</sub> O 5.01, en KCl 4.36; pedregosidad de 15% de tamaño medio, angulares y subangulares, estructura poliédrica subangular bien desarrollada; consistencia blanda en seco, muy friable en húmedo y cuando muy húmedo ligeramente pegajoso y no plástico; numerosos poros desde micro a finos continuos de orientación caótica entre y dentro de los agregados, los macroporos son tubulares oblicuos y verticales; raíces comunes finas a medias de hasta 10 mm.
<b>A3</b>	<b>50-70</b>	La transición de este horizonte a B2 es irregular, color en seco 5YR 3/2 (pardo oscuro rojizo), en húmedo 5YR 2.5/2 (pardo rojizo oscuro); textura migajón arenoso, pH en H <sub>2</sub> O 5.13, en KCl 4.26; pedregosidad de 10% rocas angulares y subangulares desde pequeñas a medianas; estructura poliédrica bien desarrollada de consistencia blanda en seco, friable en húmedo y cuando muy húmedo es ligeramente pegajoso y no plástico; micro y macroporos frecuentes continuos y de orientación caótica dentro y entre los agregados, los macroporos son tubulares oblicuos y verticales de hasta 1 mm y las raíces finas a medias son comunes de 10-20 por 3 dm <sup>-2</sup> .
<b>B</b>	<b>70-90</b>	La transición de este horizonte a C es irregular, color en seco 5YR 3/2 (pardo oscuro rojizo), en húmedo 5YR 2.5/2 (pardo rojizo oscuro); textura migajón arenoso, pH en H <sub>2</sub> O 4.25, en KCl 3.56; pedregosidad de 5%, rocas medianas, angulares, estructura bien desarrollada, consistencia blanda en seco y cuando húmedo friable, cuando muy húmedo es ligeramente plástico y ligeramente pegajoso, poros frecuentes continuos y de orientación caótica; pocas raíces medias a gruesas.
<b>C</b>	<b>90-110</b>	Color en seco 10YR 8/2 (blanco), en húmedo 10YR 6/6 (pardo amarillento); textura migajón arenoso, pH en H <sub>2</sub> O 4.24, en KCl 3.8; pedregosidad de 7%, rocas medianas, angulares, de estructura bien desarrollada, consistencia blanda en seco y cuando húmedo friable cuando muy húmedo es ligeramente plástico y ligeramente pegajoso, poros frecuentes continuos y de orientación caótica; pocas raíces medias a gruesas.

### 8.3. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL SUELO

El Cuadro 11 muestra los resultados obtenidos de las propiedades físicas y químicas de los suelos del bosque mesófilo de montaña, encontrándose que la densidad aparente (DA) y la densidad real (DR) van incrementándose con la profundidad del suelo. También se observa que la porosidad (EP) decrece al aumentar la profundidad, sin embargo, se encontró en los cinco perfiles contenidos mayores al 50 por ciento, por lo tanto, le brindan una buena aireación, drenaje y retención de humedad, favoreciendo así la distribución del sistema radical.

**Cuadro 11. Propiedades físicas de las muestras de suelo recolectadas en los cinco perfiles edáficos del BMM.**

Profundidad	H	Perfil	DA	DR	EP	Arena	Limo	Arcilla	H <sub>2</sub> O CC	Clase Textural
			g/cm <sup>3</sup>			%				
0-10	A1	1	0.59	2.27	74.06	78.56	20	1.44	57.22	Areno-migajonoso
10-35	A2		0.71	2.23	68.19	74.56	2	23.44	49.05	Migajón-arcillo-arenoso
35-65	B1		0.86	2.29	62.63	62.56	26	11.44	45.05	Migajón-arenoso
65-107	B2		0.76	2.38	68.23	72.56	16	11.44	48.04	Migajón-arenoso
107-110	C		0.75	2.44	69.21	62.56	25.64	11.8	43.46	Migajón-arenoso
0-30	A1	2	0.73	2.42	69.68	74	18.4	7.6	46.40	Migajón-arenoso
30-60	A2		0.80	2.53	68.39	72	22.4	5.6	43.18	Areno-migajonoso
60-80	A3		0.73	2.37	69.20	78	14.4	7.6	45.02	Areno-migajonoso
80-130	B		0.82	2.48	67.04	70.00	18.40	11.60	44.13	Migajón-arenoso
0-30	A1	3	0.75	2.11	64.48	54	28	18	45.68	Migajón
30-60	A2		0.81	2.38	65.91	48	26	26	44.20	Migajón-arcillo arenoso
60-90	B1		0.74	2.42	69.27	50	26	24	50.00	Migajón arcillo arenoso
90-120	B2		0.73	2.28	67.78	52	26	22	52.00	Migajón arcillo arenoso
120-150	C		0.73	2.44	70.16	34	40	26	68.84	Migajón
0-30	A1	4	0.65	1.74	62.99	72	15.84	12.16	44.77	Migajón arenoso
30-70	C1		0.54	2.46	78.00	68	19.84	12.16	23.84	Migajón arenoso
70-100	C2		0.89	2.32	61.69	70	19.84	10.16	31.15	Migajón arenoso
0-20	A1	5	0.66	1.99	66.51	58	37.84	4.16	32.00	Migajón arenoso
20-50	A2		0.74	2.17	65.80	56	39.84	4.16	50.77	Migajón arenoso
50-70	A3		0.76	1.70	55.15	59	34.84	6.16	46.37	Migajón arenoso
70-90	B1		0.67	2.02	67.05	58	33.84	8.16	48.67	Migajón arenoso
90-110	C		0.73	1.93	62.35	54	41.84	4.16	46.71	Migajón arenoso

H= horizonte. CC= capacidad de campo.

La retención de humedad tiende a disminuir conforme la profundidad aumenta, pero en los horizontes donde hay una mayor acumulación de arcilla, el porcentaje de humedad se incrementa. Por otra parte, los valores de la textura varían en el contenido de arena y arcilla, siendo la primera la que posee una alta proporción, misma que va disminuyendo al aumentar la profundidad, un efecto contrario tiene lugar con el contenido de arcilla, cabe mencionar que el tercer perfil cuenta con la mayor cantidad de ésta a diferencia de los otros cuatro, mientras que, el limo se mantiene constante en los distintos horizontes del perfil (Cuadro 11).

El contenido de materia orgánica (MO) va decreciendo conforme la profundidad del suelo aumenta, encontrándose que en las capas más superficiales, las cuales abarcan los primeros 30 cm aproximadamente, la cantidad de está es mucho mayor que en los horizontes subsiguientes (Cuadro 12). Un patrón similar presenta el pH del suelo, en general es ácido a excepción de un sitio, el cual presenta valores cercanos a la neutralidad.

**Cuadro 12. Propiedades químicas de las muestras de suelo recolectadas en el BMM de San Andrés Chichahuaxtla, Oaxaca.**

Profundidad	H	Perfil	MO %	pH ' '	pH '' "	CIC Cmol/Kg <sup>-1</sup>	CE mS/cm
0-10	A1	1	30.17	4.86	4.2	21.12	0.35
10-35	A2		22.59	4.62	3.09	24.32	0.21
35-65	B1		7.51	4.65	3.89	18.8	0.30
65-107	B2		8.77	4.68	4.1	21.36	0.13
107-110	C		6.87	4.23	3.73	25.52	0.21
0-30	A1	2	10.35	5.08	3.58	33.6	0.16
30-60	A2		8.1	5.7	4.33	32.8	0.24
60-80	A3		6.72	5.1	3.53	32.32	0.23
80-130	B		6.56	4.57	3.51	36.20	0.19
0-30	A1	3	22.87	4.27	3.67	28.96	0.33
30-60	A2		17.48	4.38	3.82	31.12	0.29
60-90	B1		8.38	4.63	3.64	31.84	0.31
90-120	B2		9.10	4.25	3.56	28.8	0.26
120-150	C		8.74	4.24	3.8	28.48	0.28
0-30	A1	4	62.87	6.51	5.67	50.4	0.41
03-70	C1		8.24	6.46	5.01	33.28	0.33
70-100	C2		8.08	6.24	5.15	32.24	0.42
0-20	A1	5	15.64	4.85	4.26	25.32	0.26
20-50	A2		15.14	4.97	4.53	28.88	0.29
50-70	A3		16.29	5.01	4.36	26.8	0.24
70-90	B1		15.80	5.13	4.26	25.52	0.24
90-110	C		14.49	5.35	4.76	25.6	0.15

H= horizonte. pH= 'Activo; '' Potencial.

En cuanto a la capacidad de intercambio catiónico (CIC), está difiere a medida que la profundidad se incrementa, dependiendo del contenido de materia orgánica y arcilla, observándose que donde se halla una mayor acumulación de las propiedades anteriormente mencionadas, los valores del CIC aumentan. La conductividad eléctrica tiende a disminuir a medida que la profundidad del perfil se incrementa notándose que en el horizonte de acumulación (B) hay un mayor complejo de cambio (Cuadro 12).

En el Cuadro 13 se presentan los datos de correlación para las propiedades del suelo, siendo valores cercanos a cero quienes muestran poca relación, mientras que valores cercanos a -1 ó 1 aumentan la asociación. Se encontró que las variables tienen asociaciones distintas entre sí, las cuales son influenciadas por factores climáticos,

topográficos y por el tipo de especies vegetales que se encuentra en el bosque; mismas que pueden favorecer o no el desarrollo de las raíces.

**Cuadro 13. Correlaciones de las propiedades físicas y químicas del suelo**

	DA	DR	EP	Arena	Limo	Arcilla	humedad	pH'	pH''	MO	CE
<b>CIC</b>	-0.1343	-0.1638	-0.0363	0.2375	-0.2175	0.0745	-0.3455	0.6572*	0.4668	0.5088*	0.3531
<b>CE</b>	-0.1489	-0.1666	-0.0043	0.1616	-0.0989	-0.0496	-0.3245	0.6168*	0.6214*	0.4686	
<b>MO</b>	-0.4396	-0.6364*	-0.1406	0.1655	-0.1601	0.0694	0.2814	0.377	0.4768		
<b>pH''</b>	-0.2143	-0.4574	-0.2017	-0.2552	0.34	-0.2973	-0.4052	0.8283*			
<b>pH'</b>	-0.2665	-0.2047	0.0286	0.097	-0.038	-0.0734	-0.6352*				
<b>Humedad</b>	-0.0202	-0.2777	-0.1616	0.0044	0.1267	-0.2658					
<b>Arcilla</b>	0.0647	0.1355	0.0736	0.2405	-0.6727*						
<b>Limo</b>	0.082	-0.4144	-0.4043	-0.8800*							
<b>Arena</b>	-0.1492	0.4566	0.4832								
<b>EP</b>	-0.6082*	0.6683*									
<b>DR</b>	0.1711										

pH='Activo; '' Potencial \*  $\rho < 0.05$ .

También se observa que la DA y la DR tienen una fuerte correlación con el porcentaje de espacio poroso y brindan al suelo una mejor estructura, junto con la materia orgánica, la cual tiene una asociación con las propiedades antes mencionadas, favoreciendo la formación de agregados así como la penetración de las raíces y son éstas las que benefician el asentamiento y desarrollo de la comunidad vegetal. Asimismo, el pH está más relacionado con la retención de humedad, la CIC, la CE; de forma semejante actúan la materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico.

La correlación encontrada entre la longitud radical y las propiedades del suelo se muestra en el Cuadro 14, se observa que ésta tiene una alta asociación con la materia orgánica, densidad aparente y pedregosidad. Estos parámetros edáficos favorecen la penetración del sistema radical, así como la obtención de recursos por la planta.

**Cuadro 14. Correlación de longitud radical con las propiedades edáficas.**

	DA	MO	L.R.	Arcilla
<b>L.R</b>	<b>0.5875</b>	<b>0.8348</b>		
<b>Arcilla</b>	0.0336	0.7795	0.0825	
<b>Pedregosidad</b>	0.0000	0.0404	<b>0.6081</b>	0.3752
<b>Conductividad</b>	0.1678	0.0000	0.6065	0.3456
<b>pH</b>	0.0464	0.0000	0.691	0.0101
<b>CIC</b>	0.2447	0.0000	0.5149	0.2239

L.R = longitud radical

La pedregosidad juega un papel importante en la distribución del sistema radical al contar con una correlación positiva de 0.6081 (Cuadro 14), ya que a medida que aumenta su porcentaje a lo largo del perfil (Fig. 6). La penetración de las raíces gruesas se ve limitada, caso contrario ocurre con las raíces finas, a pesar de que se registró una disminución de éstas, aún son capaces de alcanzar el 15% de la biomasa total del sistema radical cuando la pedregosidad es de 40%.



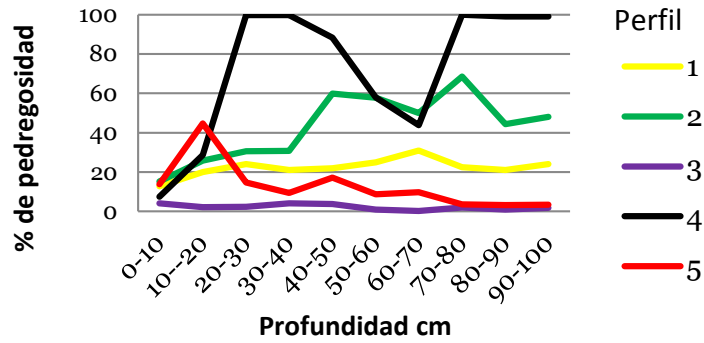


Figura 6. Variación de la pedregosidad a lo largo de los perfiles.

#### 8.4. LONGITUD, ÁREA Y BIOMASA RADICAL

El comportamiento longitudinal de las distintas clases diamétricas del sistema radical conforme aumenta la profundidad del suelo, se muestra en la figura 7a, es claro que las raíces más finas (<0.5 y 0.6-1.0 mm) alcanzan el 94% de la longitud total del sistema radical en los primeros 30 centímetros del perfil (Fig. 7a). También es aquí donde el contenido de materia orgánica alcanza sus más altos valores entre 15 y 50% (Cuadro 12), a partir de esta profundidad las raíces tienden a disminuir, apreciándose nuevamente un incremento en la profundidad de 50 a 70 cm de espesor siempre coincidiendo con el horizonte B, posteriormente se registra un descenso continuo de estas en el resto del perfil del suelo.

A pesar de que los grupos diamétricos mayores a 1mm se mantienen constantes a lo largo del perfil, no presentan un dominio en su longitud sobre las raíces finas, esto se debe a que la función principal de las raíces gruesas es soportar la vegetación y como almacén de nutrientes, mientras, que las raíces finas son las encargadas de la exploración del suelo para poder absorber éstos, por lo tanto, su distribución es mucho mayor.

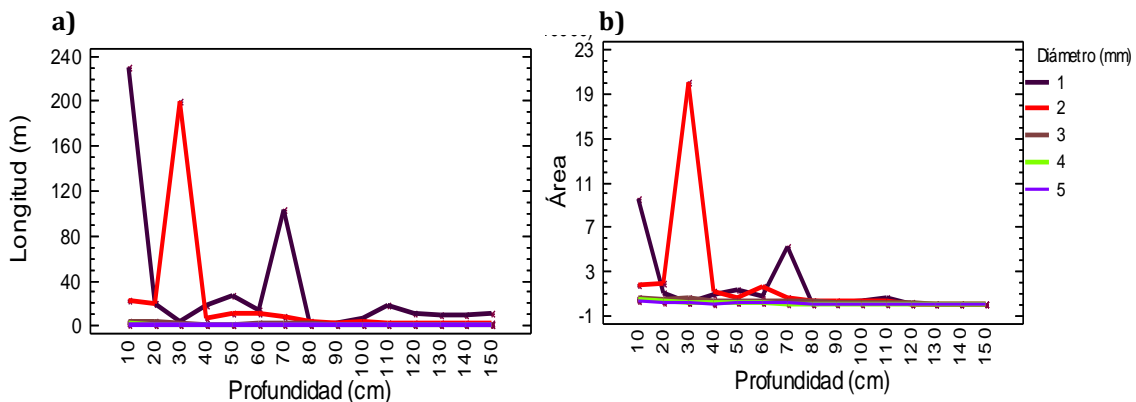


Figura 7. Variación de la a) longitud y b) área de superficie expuesta del sistema radical del bosque mesófilo de montaña a lo largo del perfil de suelo en San Andrés Chicahuaxtla, Oaxaca.

El área de superficie expuesta por el sistema radical (Fig. 7b) sigue el mismo patrón antes descrito para la longitud, se observa que el grupo de raíces cuyo diámetro oscila entre 0.6-1.0 mm exponen el 54% del área de superficie total y se encuentra distribuido entre los 20 a 40 cm de profundidad, mientras que, las raíces con diámetro superior a 1 mm, varían poco respecto a este parámetro a lo largo del perfil de suelo.

En las figuras 8 y 9 se muestran los porcentajes encontrados para longitud y superficie expuesta por las raíces de los cinco grupos diamétricos. Se incluye al sistema radical que se distribuye en el suelo mineral y aquel que se desarrolla en el espesor de mantillo (horizonte O). Es importante observar que la abundancia de las raíces tiene el siguiente patrón de distribución a lo largo del perfil: 0.5 mm o menores > 0.6-1.0 > 1.1-2 > 2.1-3 > 3, este mismo patrón se observó para la longitud y área de superficie expuesta, tanto para el sistema radical que se distribuye en el suelo mineral como para las raíces del mantillo, excepto para las raíces de 0.6 a 1.0 mm en suelo cuya superficie es mucho mayor, como se ha explicado anteriormente. En el caso del horizonte O el 99% del sistema radical es menor a 1mm de diámetro (Fig. 7b).

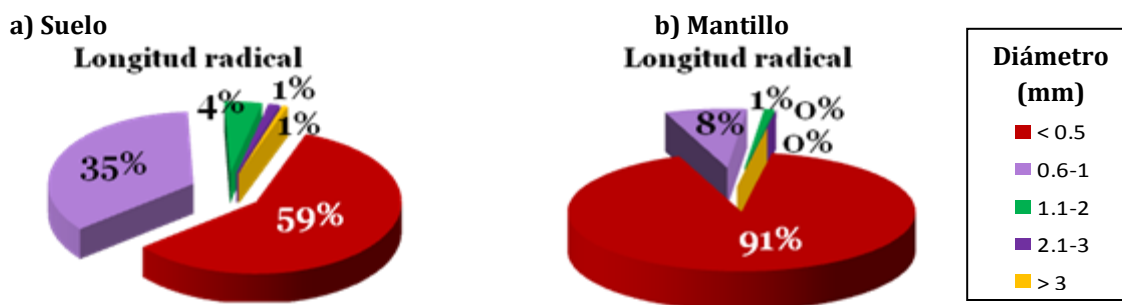


Figura 8. a) y b) Porcentaje de longitud de los cinco grupos diamétricos de raíces encontradas en suelo y mantillo respectivamente.

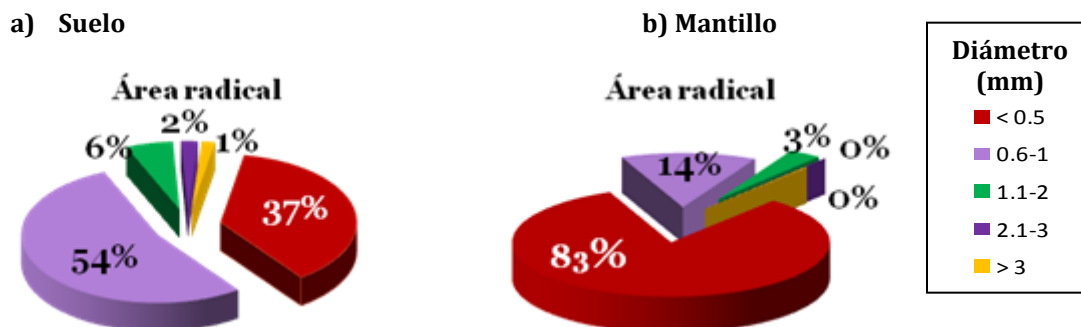


Figura 9. Porcentaje de superficie expuesta de las distintas clases de raíces. Encontradas en a) suelo y b) mantillo.

Por otra parte, se encontró que el área de superficie expuesta por las raíces menores a 1mm de diámetro en el suelo mineral es de 91%; mientras que, el área que este mismo grupo de raíces expone en el mantillo alcanza el 97% (Fig. 9a y b). En tanto los grupos diamétricos restantes, cubren una extensión del 6 y 3 por ciento del total de la superficie expuesta en suelo y mantillo respectivamente. El análisis multivariado de varianza (MANOVA) muestra que no existe diferencia significativa de

la profundidad del suelo con los parámetros: diámetro, longitud y área de superficie expuesta del sistema radical (Cuadro 15).

**Cuadro 15. Análisis multivariado de varianza (MANOVA) para longitud y área de superficie expuesta por el sistema radical.**

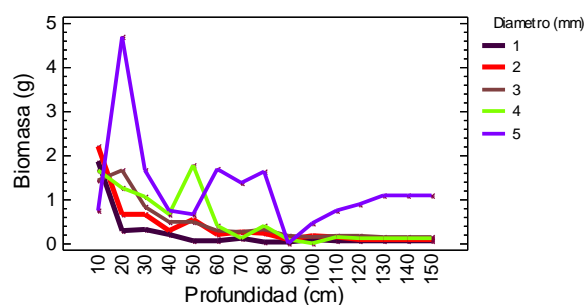
Fuente de variación	Suma de cuadrados	g.l.	Cuadrados medios	Fo	P
<b>Longitud</b>					
A	2744.77	14	196.055	1.06	0.394
B	1479.91	4	369.976	2	0.095
<b>Interacciones</b>					
AB	6522.89	56	116.48	0.63	0.9788
Error	40626	220	184.664		
Total	52762	294			
<b>Área de superficie</b>					
A	4.36E+10	14	3.11E+09	0.71	0.7588
B	1.22E+10	4	3.05E+09	0.7	0.5926
<b>Interacciones</b>					
AB	1.70E+11	56	3.03E+09	0.7	0.9456
Error	9.59E+11	220	4.36E+09		
Total	1.20E+12	294			

Todos los valores de F son con base en los cuadrados medios del error. g.l. grados de libertad. Fo valores de Fisher para la hipótesis nula. A= Profundidad B= Diámetro.

En los bosques mesófilos de montaña de San Andrés Chicahuaxtla, la biomasa del sistema radical es mayor en las raíces con diámetro superior a 3 mm, seguidas de las de 2.1-3 > 1.1-2 > 0.6-1.0 > 0.5 mm, indistintamente de la profundidad del suelo, para el caso del mantillo son las raíces con diámetro < 0.5 mm, quienes presentan los valores más altos de biomasa (Cuadro 16). En general la biomasa disminuye a medida que se incrementa la profundidad del suelo (Fig. 10).

**Cuadro 16. Biomasa de las clases diamétricas**

Diámetro	Biomasa (Mg ha <sup>-1</sup> )		
	Suelo	Mantillo	Total
< 0.5	54.54	30.75	85.29
0.6-1.0	55.23	14.53	69.76
1.1-2	60.70	9.87	11.21
2.1-3	61.58	0.38	70.57
> 3	113.16	3.08	116.24



**Figura 10. Variación de la biomasa del sistema radical a medida que la profundidad del suelo se incrementa.**

El porcentaje de biomasa del sistema radical encontrado en el suelo mineral se muestra en la figura 11a, en donde evidentemente las raíces mayores a 3 mm de grosor conforman el 33% del total, mientras que los grupos diamétricos restantes se mantienen muy homogéneos. Por otra parte en el horizonte orgánico las clases de 0.6-1.0 y menores a 0.5 mm suman el 75%, de la biomasa, en cuanto a las raíces mayores a 3 mm claramente se ve un descenso de éstas, representando apenas el 5% de biomasa total del sistema radical hallado en este horizonte (Fig. 11b).

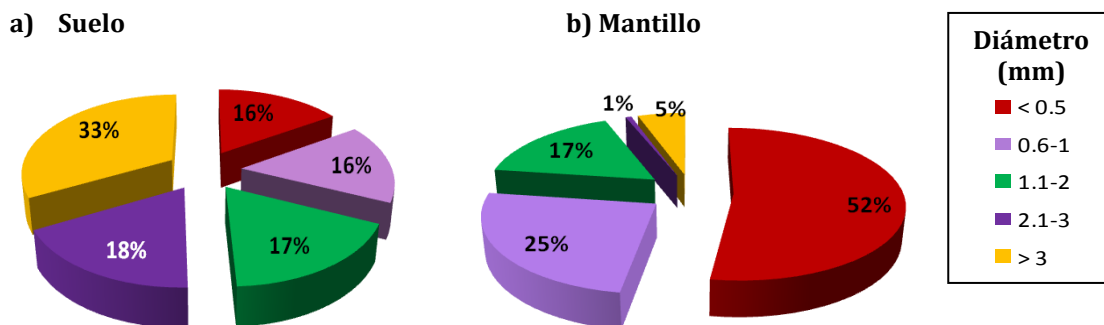


Figura 11. Porcentaje de biomasa radical total para a) suelo y b) mantillo del BMM.

Se realizó el análisis de varianza para biomasa, con la finalidad de observar que propiedades causan un mayor efecto sobre ésta, las variables consideradas fueron profundidad y diámetro, encontrando una diferencia significativa alta (Cuadro 17).

Cuadro 17. Análisis de varianza (MANOVA) para biomasa

Fuente de variación	Suma de cuadrados	g.l.	Cuadrados medios	Fo	P
<b>Efectos principales</b>					
A	81.4365	14	5.81689	2.70	0.0010
B	43.9172	4	10.9793	5.09	0.0006
<b>Interacciones</b>					
AB	73.7093	56	1.31624	0.61	0.9865
Error	625.611	290	2.15728		
<b>Total</b>	<b>73.7093</b>	<b>56</b>			

Todos los valores de F son con base en los cuadrados medios del error. g.l. grados de libertad. Fo valores de Fisher para la hipótesis nula. A= Profundidad B= Diámetro.

### 8.5. NUTRIMENTOS EN MANTILLO, SUELO Y RAÍZ.

Los contenidos de nutrientes cuantificados en el horizonte orgánico (mantillo) se pueden observar en el Cuadro 18, donde es evidente que los valores de nitrógeno mantienen una media del 5.73%, mientras que el fósforo presentan una media de 8.61 cmol kg<sup>-1</sup>, así mismo el hierro y potasio alcanza valores de 0.259 g kg<sup>-1</sup> y 467.49 mg kg<sup>-1</sup> respectivamente. Al realizar la correlación y el análisis de varianza los datos no presentaron diferencia significativa.

Cuadro 18. Contenido de nitrógeno, fósforo, potasio, hierro y azufre en el horizonte orgánico.

Sitio	N	P	K	Fe	S
	%	cmol kg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>
1	5.967	8.8615	281.385	0.318	641.152
2	5.843	7.6178	384.852	0.2572	635.616
3	5.462	13.0591	449.202	0.1597	687.072
4	6.827	9.3279	582.153	0.265	815.36
5	4.575	4.1976	639.795	0.2955	912.832
<b>Media</b>	<b>5.735</b>	<b>8.6128</b>	<b>467.493</b>	<b>0.2591</b>	<b>738.4096</b>

En el Cuadro 19 se muestran los valores obtenidos para cada nutrimento de los distintos horizontes genéticos del suelo. Nótese que la concentración más alta de nitrógeno se encuentra en los horizontes superficiales del suelo, mismo que va disminuyendo al aumentar la profundidad, sin embargo, hay un incremento de su contenido en el horizonte B o de acumulación. También se puede distinguir que las concentraciones de fósforo en el horizonte A en dos de los perfiles son menores, y conforme se incrementa la profundidad del suelo igualmente los valores del nutrimento, caso contrario ocurre en los tres perfiles restantes pues se observa que la concentración de fósforo decrece al aumentar la profundidad.

**Cuadro 19. Contenido de nutrimentos en las muestras de suelo recolectadas en el BMM.**

Profundidad	Perfil	Horizonte	N	P	K	Fe	S
			%	cmol/kg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>
0-10	1	A1	3.5	0.0337	162.63	10	345.984
10-35		A2	1.68	0.6002	78	0.625	1263.584
35-65		B1	0.71	3.4292	46.8	4.375	768.352
65-107		B2	1.24	0.0432	63.57	1.25	373.184
107-110		C	0.53	2.1007	35.49	3.125	282.464
0-30	2	A1	0.8	0.0489	80.34	8.75	297.088
30-60		A2	0.53	9.6948	102.57	0.625	437.92
60-80		B1	0.27	6.2904	29.64	12.5	410.304
80-130		B2	0.47	5.1556	37.44	0.625	442.112
0-30	3	A1	1.46	9.7994	57.72	12.5	361.472
30-60		A2	0.67	0.0337	75.66	3.75	217.12
60-90		B1	0.13	8.7892	10.53	1.25	76.704
90-120		B2	0.27	1.7174	24.57	0.625	632.448
120-150		C	0.27	14.4912	70.98	10	278.848
0-30	4	A	10.24	65.5463	484.77	5	632.448
30-70		C1	0.08	40.0088	64.74	11.25	165.088
70-100		C2	0.03	46.8188	27.69	9.375	622.656
0-20	5	A1	0.4	24.6863	22.23	7.5	878.944
20-50		A2	1.6	9.3638	79.95	3.75	88.928
50-70		A3	2	20.43	42.12	7.5	401.056
70-90		B1	2.53	0.0766	23.4	1.25	5.984
90-110		C	2	19.5788	31.59	3.125	20.352

Por otra parte, el contenido de los nutrimentos potasio, hierro y azufre, tienden a disminuir al incrementar la profundidad del suelo, en el caso del hierro nótese un incremento de éste en el horizonte C, mientras que, el azufre se encuentra en el horizonte de acumulación (B).

Para el análisis de correlación de los nutrimentos del suelo con las propiedades edáficas, únicamente el nitrógeno, fósforo y potasio obtuvieron valores cercanos a uno, relacionados con la materia orgánica, pH activo y potencial, así como, la capacidad de intercambio catiónico, densidad real, conductividad eléctrica y retención de humedad (Cuadro 20). El fósforo se correlaciona con todas las propiedades antes mencionadas, mientras que el nitrógeno sigue la tendencia: MO > DR > pH potencial > CIC, por último el potasio presenta correlación con: MO > CIC > pH potencial > pH

activo > CE. Cabe mencionar que el hierro y el azufre no presentaron diferencia significativa con las propiedades del suelo, por lo tanto su correlación con éstas es menor.

**Cuadro 20. Correlación de los nutrientes con las propiedades del suelo.**

	P	K	Fe	S	MO	pH'	pH''	CIC	CE	DR	H2O CC
<b>N</b>	0.5085	0.9216	-0.0344*	0.1252*	0.9506	0.4151*	0.5386	0.4974	0.3454*	-0.638	0.1308*
<b>P</b>		0.5648	0.3137*	0.1387*	0.5038	0.7972	0.8381	0.6357	0.6107	-0.4239	-0.4738
<b>K</b>			0.0437*	0.1855*	0.903	0.4738	0.5276	0.6351	0.4355	-0.3755*	0.0817*
<b>Fe</b>					0.0715*	0.2138*	0.1747*	0.0778*	0.3999*	-0.0573*	-0.158*
<b>S</b>					0.2432*	-0.041*	-0.102*	-0.093*	0.1307*	-0.1385*	0.483*

\* Sin diferencia significativa; 'Activo; '' Potencial.

Con relación a los nutrientes evaluados, se aprecia claramente una asociación entre, nitrógeno, fósforo y potasio, mostrando una correlación cercana a 1 entre el N y K (Cuadro 20). Con respecto al Fe y S, estos nutrientes presentan correlaciones bajas. Se realizó el análisis de varianza (ANOVA) para los nutrientes del suelo, encontrándose solamente diferencia significativa entre N-Fe, P-N, P-Fe y K-Fe (Cuadro 21).

**Cuadro 21. Análisis de varianza para los nutrientes del suelo.**

Fuente	Suma de cuadrados	g.l.	Cuadrados medios	Fo	P
<b>N-P</b>	94.4893	20	4.72447	1.18	0.6221
<b>N-Fe</b>	85.6695	11	7.78814	6.07	0.004*
<b>N-S</b>	48.7933	20	2.43967	0.05	0.9998
<b>P-N</b>	6247.26	17	367.486	13.01	0.0117*
<b>P-Fe</b>	5943.25	11	540.295	12.96	0.0002*
<b>P-S</b>	4323.17	20	216.158	0.11	0.994
<b>K-Fe</b>	124.852	11	11.3502	16.86	0.0001*
<b>K-S</b>	61.9635	20	3.09818	0.04	0.9999
<b>Fe-S</b>	36351.2	20	1817.56	1.9	0.5159

Todos los valores de F son con base en los cuadrados medios del error. g.l. grados de libertad. Fo valores de Fisher para la hipótesis nula. \* diferencia significativa.

Con el propósito de observar los valores que presentan diferencia, se realizó la prueba de Tukey, utilizando las medias obtenidas del análisis de varianza. Las gráficas de la Figura 12 muestran que el nitrógeno, fósforo y potasio son afectados por el contenido de hierro, igualmente el P de los valores de N.

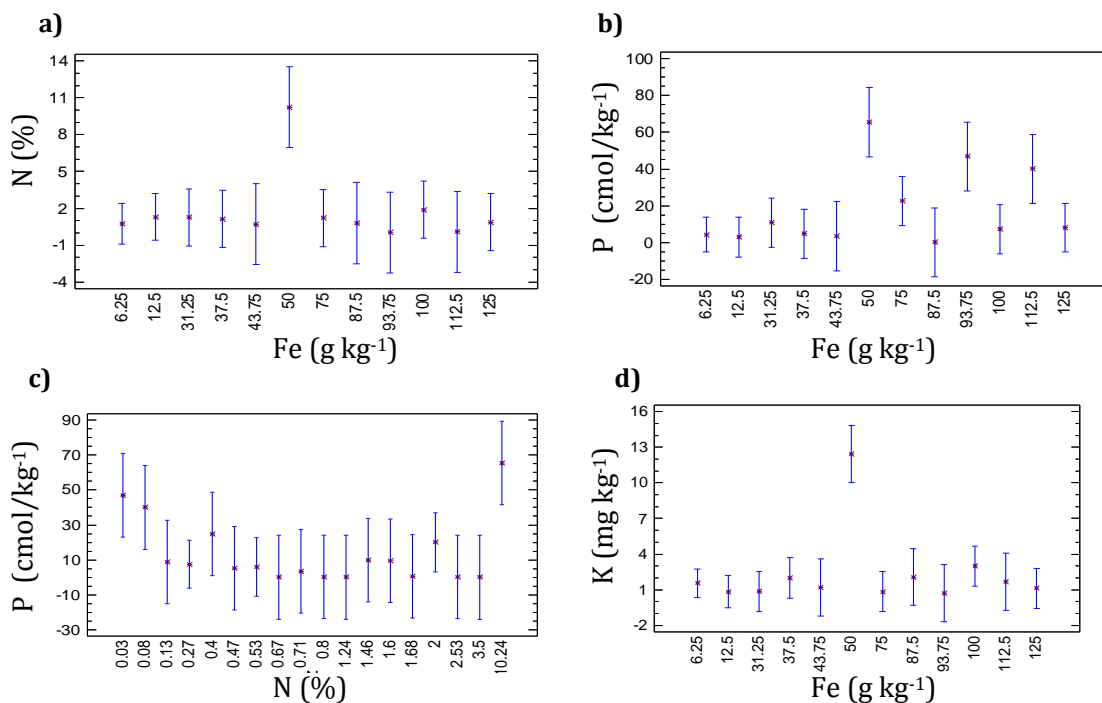


Figura 12. Prueba de Tukey para los nutrientes del suelo, se muestran únicamente las variables con diferencia significativas.

En el cuadro 22 se puede apreciar el contenido de nutrientes de las raíces encontradas en el perfil del suelo, así como, las del horizonte orgánico (mantillo) donde se distingue una concentración mayor de nitrógeno, el cual es acumulado principalmente por las raíces menores a 1 mm de diámetro. Los contenidos de fósforo presentan un patrón semejante al descrito para nitrógeno, a diferencia de éste último, se puede distinguir un incremento de P en los grupos diamétricos de 1.1-2 y 2.1-3 respectivamente, para las raíces del suelo y mantillo.

Los valores más altos del contenido de potasio, se encontraron en el grupo diamétrico de 1.1-2 mm, mientras que las clases de 0.6-1.0 y 1.1-2 mm, fueron las que presentaron una mayor concentración de este nutriente en el sistema radical referente al horizonte orgánico. Asimismo, los grupos diamétricos de 0.6-1.0 y 2.1-3 mm de las raíces distribuidas en el suelo presentan valores entre 800 y 1000 mg kg<sup>-1</sup> de azufre (Cuadro 22). El hierro muestra valores hasta de 1500 g kg<sup>-1</sup> en raíces < 0.5 mm, mismo que desciende al aumentar el diámetro radical, es preciso señalar que es el único nutriente evaluado que presenta una tendencia lineal.

**Cuadro 22. Contenido de nutrimentos por clase diamétrica del sistema radical.**

Diámetro	Perfil	N <sup>1</sup>	N <sup>2</sup>	P <sup>1</sup>	P <sup>2</sup>	K <sup>1</sup>	K <sup>2</sup>	S <sup>1</sup>	S <sup>2</sup>	Fe <sup>1</sup>	Fe <sup>2</sup>
		%	cmol Kg-1		mg kg <sup>-1</sup>		mg kg <sup>-1</sup>		g kg <sup>-1</sup>		
≤0.5	1	4.123	4.123	18.963	21.788	452.79	247.338	971.1	983.1	110.75	159.375
0.6-1.0		1.862	4.575	13.314	27.436	121.095	981.513	1020	1083.6	113	103.125
1.1-2		0.798	1.463	15.332	37.523	334.113	650.559	857.9	1116.9	57.833	16.875
2.1-3		0.665		14.121		462.267	0	1039	0	29.5	0
>3		0.027		10.086		414.96	0	438	0	18.333	0
≤0.5	2	2.926	21.81	20.98	8.876	0	470.028	857.9	749.8	0	202.5
0.6-1.0		1.729	15.96	19.77	8.473	383.721	421.746	935.9	651.1	492.5	66.875
1.1-2		1.929	9.709	24.612	21.384	241.917	788.736	890.7	989.1	233	35
2.1-3		0.94		19.366		341.796	0	1058	0	173.5	0
>3		0.053		14.525		687.102	0	857.9	0	114.17	0
≤0.5	3	2.261	6.916	25.015	35.506	293.007	783.705	885.1	655.6	156	120.625
0.6-1.0		1.995	7.847	27.032	16.139	317.694	269.685	918.8	941.7	93.75	103.75
1.1-2		2.394	2.66	8.473	13.315	369.954	593.385	472.1	800	72.5	68.75
2.1-3		3.724		24.612		175.89	0	1007	0	57.5	0
>3		0.266		10.893		525.135	0	831.2	0	54.375	0
≤0.5	4	0.532	4.655	22.998	27.033	1157.91	113.1	1051	637.7	1598.1	82.5
0.6-1.0		3.724	4.389	12.507	29.05	365.313	516.204	1051	784.7	274.38	67.5
1.1-2		1.729	0.798	10.086	15.332	774.111	492.843	1026	594	215	32.5
2.1-3		2.261		10.893		533.52	0	890.7	0	157.5	0
>3		1.729		6.0521		469.482	0	1090	0	70	0
≤0.5	5	3.458	7.315	28.243	22.191	198.12	118.365	941.7	965.2	394.38	362.5
0.6-1.0		2.128	5.054	21.787	18.963	340.977	375.258	1090	1057.6	256.33	118.125
1.1-2		0.771	7.049	13.314	15.736	386.568	203.814	701.8	847.1	84.833	78.125
2.1-3		0.333	1.197	18.559	15.736	583.635	630.123	1045	890.7	65.167	61.25
>3		0.399	2.66	6.8591	14.122	289.263	513.318	543.7	1007.4	28.125	46.875

Raíces de: 1= suelo, 2= mantillo

El mayor contenido nutrimental es proporcionado por las raíces menores a 2 mm de diámetro para el caso de las raíces encontradas en mantillo. En cuanto al sistema radical del suelo existe mayor variación en el contenido de azufre y potasio (Fig. 13 c y d), mientras que, para nitrógeno, hierro y fósforo los valores más altos se encuentran en los grupos diamétricos más finos (<0.5), la cantidad disminuye a medida que el diámetro radical aumenta (Fig. 13 a, b, e).



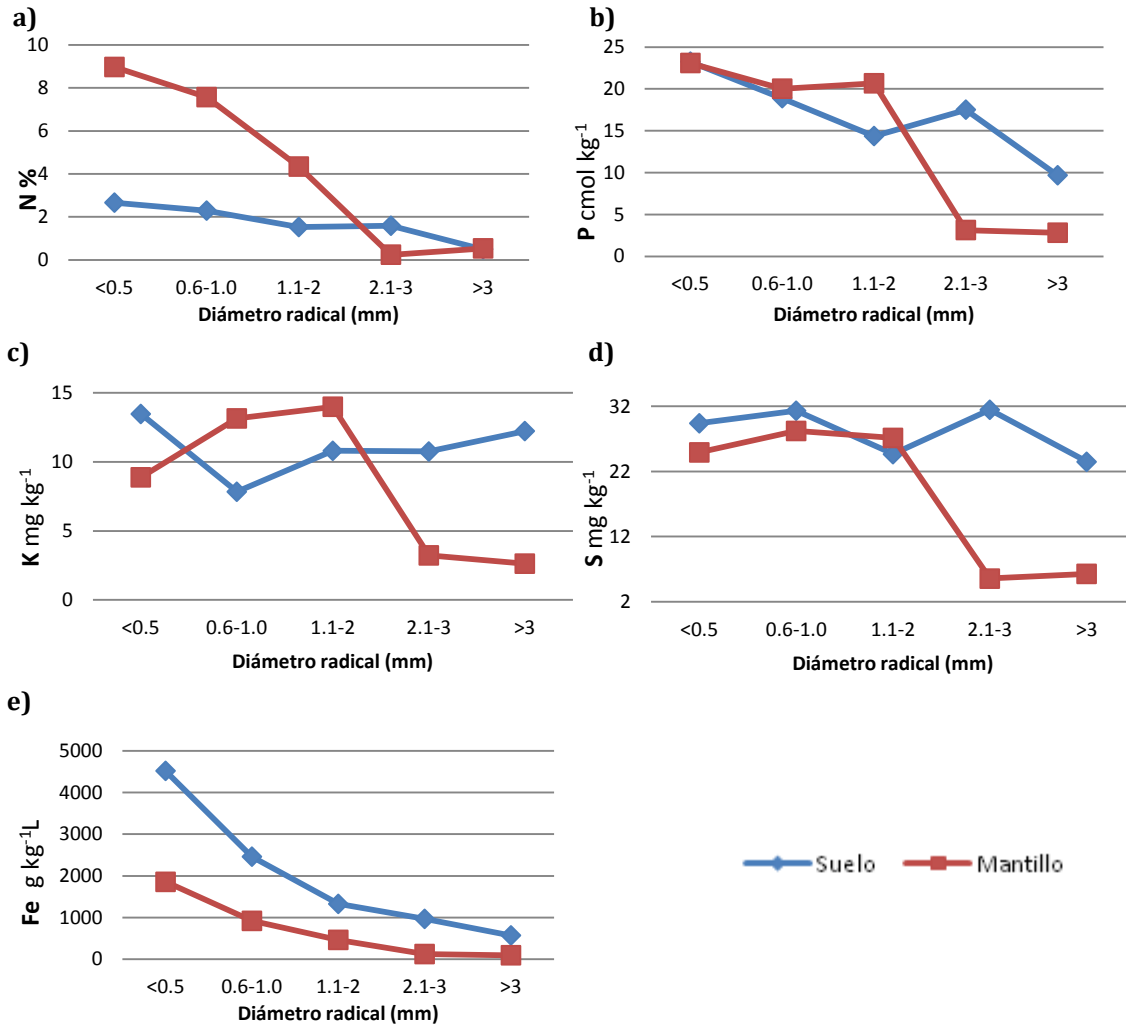


Figura 13. Contenido de nutrientes de las raíces encontradas en suelo mineral y mantillo del bosque mesófilo de montaña.

El análisis de correlación para los nutrientes del sistema radical se presenta en el cuadro 23, es evidente que la mayoría de los nutrientes presentan una alta correlación negativa con el diámetro radical a excepción del potasio y azufre de las raíces del suelo mineral. También se muestra una alta correspondencia entre el fósforo y azufre en las raíces del mantillo. En tanto al área y longitud radical no presentaron correlación alguna con los nutrientes.

Cuadro 23. Correlaciones entre nutrientes del sistema radical presentes en mantillo y suelo ( $\alpha < 0.05$ ).

Variables	Correlación	Variables	Correlación	Variables	Correlación
D-N <sup>1</sup>	-0.5701	D-Fe <sup>2</sup>	-0.7294	P <sup>1</sup> -Fe <sup>2</sup>	0.3473
D-N <sup>2</sup>	-0.646	N <sup>1</sup> -Fe <sup>2</sup>	0.4999	P <sup>2</sup> -K <sup>2</sup>	0.7394
D-P <sup>1</sup>	-0.6205	N <sup>2</sup> -P <sup>1</sup>	0.5118	P <sup>2</sup> -S <sup>2</sup>	0.8274
D-P <sup>2</sup>	-0.7523	N <sup>2</sup> -P <sup>2</sup>	0.4334	P <sup>2</sup> -Fe <sup>2</sup>	0.5116
D-K <sup>2</sup>	-0.4061	N <sup>2</sup> -K <sup>2</sup>	0.4107	K <sup>1</sup> -Fe <sup>1</sup>	0.6306
D-S <sup>2</sup>	-0.6433	N <sup>2</sup> -S <sup>2</sup>	0.5667	K <sup>2</sup> -S <sup>2</sup>	0.7517
D-Fe <sup>1</sup>	-0.4925	N <sup>2</sup> -Fe <sup>2</sup>	0.4905	S <sup>2</sup> -Fe <sup>2</sup>	0.5869

D = diámetro; 1 = raíces de suelo, 2 = raíces de mantillo.

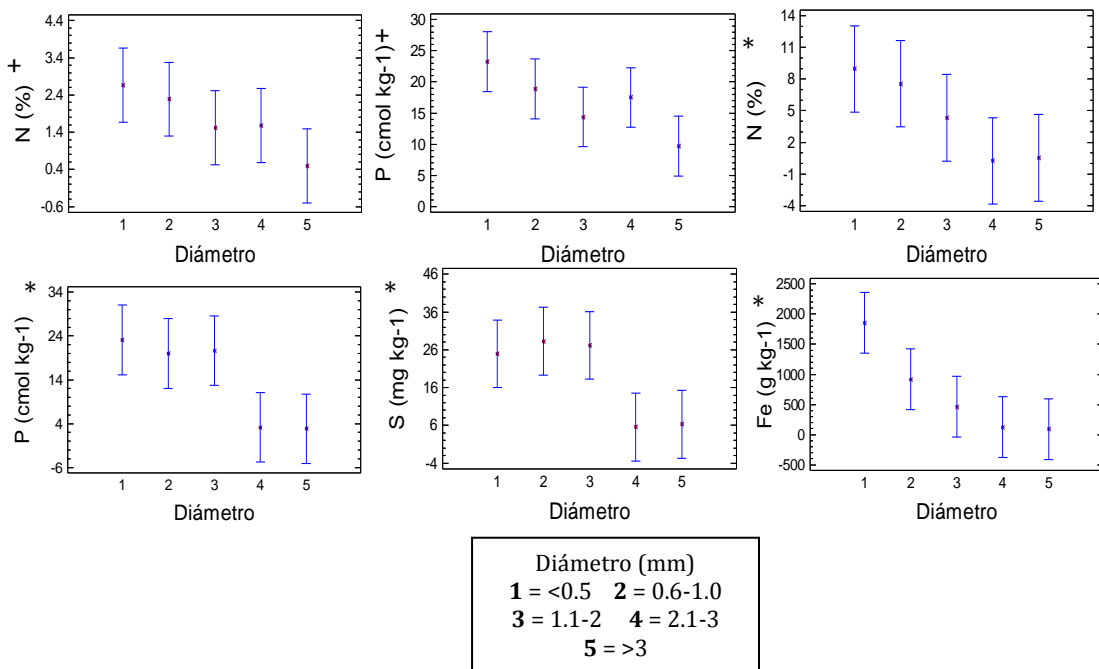
Los valores del ANOVA realizado para los nutrientes del sistema radical se muestran en el cuadro 24. Para las raíces del suelo mineral el nitrógeno y fósforo presentan diferencia significativa a medida que el diámetro es mayor, de la misma forma ocurre con todos los nutrientes de raíces en mantillo.

**Cuadro 24. Análisis de varianza de nutrientes y diámetro radical en suelo y mantillo.**

Fuente	Suma de cuadrados	g.l.	Cuadrados medios	Fo	P
<b>N<sup>1</sup></b>	13.8154	4	3.45385	3.12	0.0378*
<b>P<sup>1</sup></b>	514.388	4	128.597	4.99	0.0059*
<b>K<sup>1</sup></b>	82.3674	4	20.5919	0.61	0.6591
<b>S<sup>1</sup></b>	283.168	4	70.792	2.81	0.0533
<b>Fe<sup>1</sup></b>	72068300	4	18017100	2.11	0.1196
<b>N<sup>2</sup></b>	315.494	4	78.8736	4.19	0.0126*
<b>P<sup>2</sup></b>	2027.81	4	506.952	7.19	0.0009*
<b>S<sup>2</sup></b>	2639.07	4	659.767	7.31	0.0008*
<b>K<sup>2</sup></b>	82.3674	4	20.5919	0.61	0.6591
<b>Fe<sup>2</sup></b>	10694400	4	2673600	9.42	0.0002*

Todos los valores de F son con base en los cuadrados medios del error. g.l. grados de libertad. Fo valores de Fisher para la hipótesis nula. \* Diferencia significativa. Raíces: 1 = suelo, 2 = mantillo.

Se realizó la prueba de Tukey con el fin de observar que variables son las que muestran una diferencia, siendo los grupos diamétricos: 2.1-3 y > 3 mm los que marcan la mayor variación en las raíces del mantillo, por otra parte en las raíces de suelo > 3 mm se encontró diferencia significativa (Fig. 14).



**Figura 14. Variación del contenido de nutrientes por clase diamétrica del sistema radical en suelo (+) y mantillo (\*), se muestran únicamente las diferencias significativas.**

El análisis de varianza se realizó para observar si los nutrimentos de las raíces presentan diferencia significativa con la longitud y área radical, de esta forma, de los nutrimentos analizados N, P, K, S y Fe, se observó que únicamente el N y P presentan diferencia significativa, mismos que se aprecian en el Cuadro 25.

**Cuadro 25. Análisis de varianza para la longitud y área de superficie del sistema radical con el contenido nutrimental del mismo, se indican únicamente las diferencias significativas.**

Fuente	Suma de cuadrados	g.l.	Cuadrados medios	Fo	P
L- N <sup>2</sup>	22319	16	1394.94	185	0.0000
L- P <sup>1</sup>	573169	20	286584	624.92	0.0000
L- P <sup>2</sup>	22379.2	16	1398.7	75080.52	0.0000
A- N <sup>1</sup>	1846760	20	92338.2	57.75	0.0006
A- N <sup>2</sup>	67613.5	16	4225.84	18240.49	0.0000
A- P <sup>1</sup>	1852700	20	92635.2	815.8	0.0000
A- P <sup>2</sup>	67611.1	16	4225.69	7875.58	0.0000

Todos los valores de F son con base en los cuadrados medios del error. g.l. grados de libertad. Fo valores de Fisher para la hipótesis nula. L = longitud, A = área; Raíces: 1 = suelo, 2 = mantillo.

En la Figura 15 se representa el aporte de nutrimentos del BMM estudiado, en el cual, la precipitación aporta principalmente N y K (1). La caída de hojas al suelo forestal y su posterior mineralización liberan principalmente N, P, K (2), por otra parte, en la capa de mantillo los contenidos de N, P, K, Fe y S se mantiene constantes, los cuales por acción de los microorganismos son liberados a la solución del suelo (3). También las raíces finas contribuyen con grandes cantidades de nutrimentos al horizonte orgánico pues de acuerdo a Pavón y Briones (2000) el 80 % de la productividad primaria neta es aportado por el sistema radical fino (4), por último el material parental libera pocas cantidades de nutrimentos a la solución del suelo (5).

Los mayores contenidos de nutrimentos del suelo mineral, así como, longitud radical y área de superficie expuesta del sistema radical se encontraron en los horizontales más superficiales, mismos que van disminuyendo conforme aumenta la profundidad del suelo (6), debido a que la descomposición de la MO es más activa en estas capas, por tanto, las raíces principalmente las menores a 2 mm de diámetro absorben los recursos necesarios para la planta (7), los cuales son retranslocados a diferentes órganos de la misma para realizar diversas funciones metabólicas (8). Algunas pérdidas de nutrimentos son debidos a los procesos de evaporación (9) y lixiviación (10).

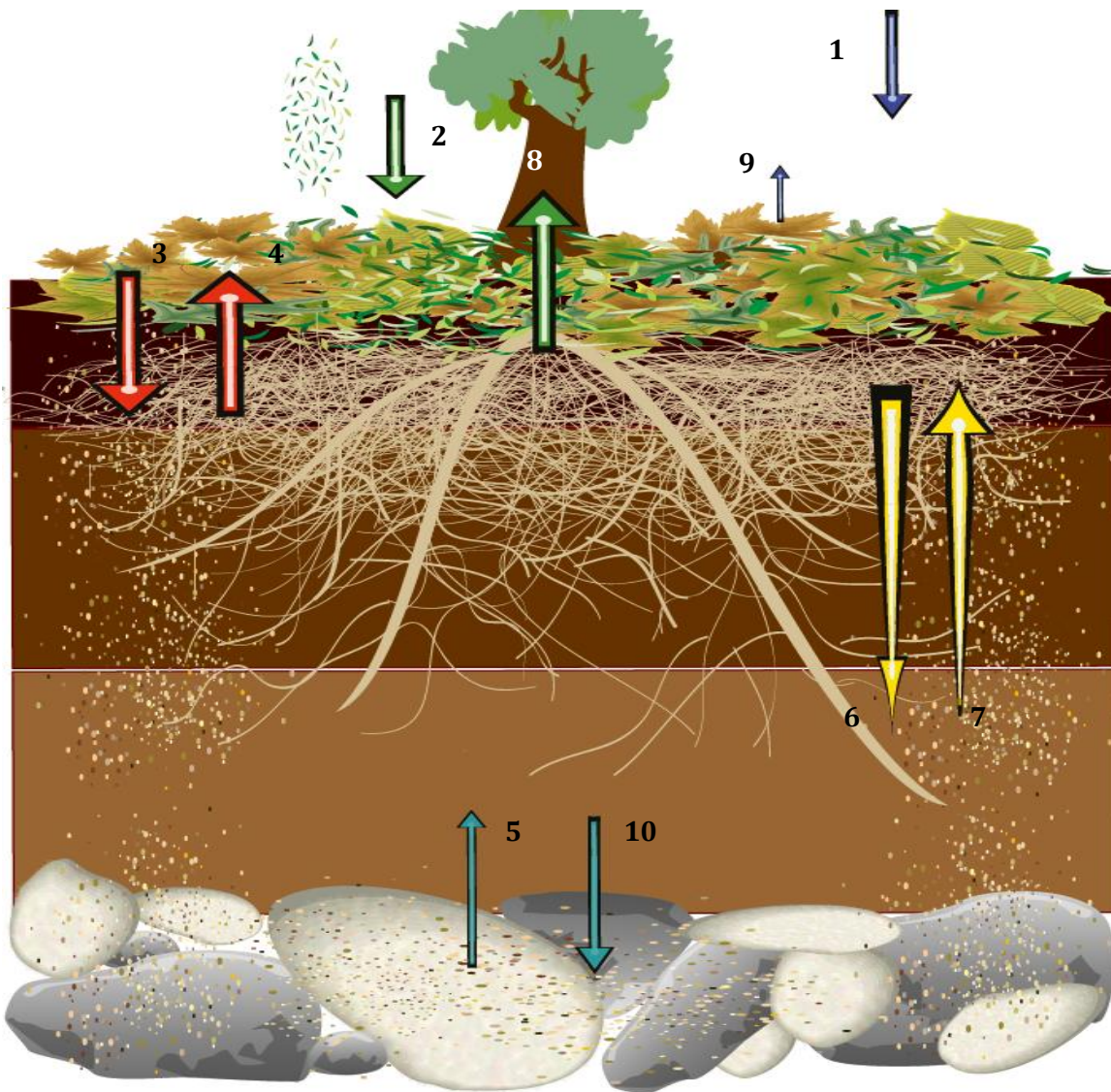


Figura 15. Modelo hipotético del aporte de nutrientes disponibles en el fragmento de bosque mesófilo de montaña de San Andrés Chicahuaxtla, el grosor de las flechas indica la importancia relativa de un proceso particular.

## IX. DISCUSIÓN

### 9.1. CLASIFICACIÓN DE SUELOS

En el municipio de Putla Villa de Guerrero en el estado de Oaxaca, se han reportado seis tipos de suelo: Cambisol, Gleysol, Luvisol, Leptosol, Regosol y Phaeozem (INEGI, 2007). Para el caso particular de los bosques mesófilos de montaña (BMM), Álvarez *et al.* (2008) registro suelos cambisoles; mientras que Mejía-Domínguez *et al.* (2004) registró regosoles como medio de soporte de este tipo de vegetación. En el presente estudio, se encontraron tres tipos de suelos: Cambisol, Leptosol y Regosol, para el BMM de la comunidad de San Andrés Chicahuaxtla.

De acuerdo con la IUSS (2007) el Cambisol es un suelo joven caracterizado por presentar un horizonte subsuperficial incipiente y una meteorización ligera a moderada del material parental; este tipo de suelo puede encontrarse en llanuras o zonas montañosas. Para el caso del cambisol estudiado, éste cuenta con un horizonte B poco diferenciado, debido a que está en proceso de formación, los valores de pH son moderadamente ácidos de acuerdo con la NOM-021- RECNAT-2002, mientras que, los contenidos de materia orgánica varían de 6.5 a 10.3 por ciento. Para el caso del Cambisol, este suelo presenta densidades de 0.73 a 0.82 g/cm<sup>3</sup>, cuyos valores concuerdan con lo reportado por Alvarado y Forsythe (2005) y Marques *et al.* (2007) para este tipo de suelo.

Con respecto al Leptosol, este suelo presenta una textura migajón-arenoso, un pH cercano a la neutralidad de 6.5 y es clasificado como moderadamente ácido por la NOM-021- RECNAT-2002. Por otra parte el contenido alto de MO (66%) en el horizonte superficial, le hereda un color oscuro (Bautista-Zuñiga, 2003), y una alta CIC (50 cmol kg<sup>-1</sup>). En cuanto al Regosol se tiene un contenido bajo de arcillas a lo largo del perfil, debido a que se desarrollan en materiales no consolidados y su formación es producida principalmente por erosión hídrica. Éste suelo presentó un pH de moderadamente ácido a fuertemente ácido, y un contenido bajo de materia orgánica.

## 9.2. PROPIEDADES EDÁFICAS

Las variaciones en las propiedades químicas y físicas de los suelos de este estudio, se deben principalmente a los proceso de génesis durante la interacción de los factores: clima, vegetación y material parental encontrados. De acuerdo con Fu *et al.* (2004), Zushi (2006) y Beck *et al.* (2008) las propiedades del suelo también están influenciadas por la topografía de la zona, así como la altitud.

En los estudios realizados por Carvajal (2003), Kuchenbuch *et al.* (2004), Zhou y Shangguan (2007) y Macinnis-Ng *et al.* (2010), indican que la densidad aparente (DA) aumenta junto con la profundidad, mismo comportamiento fue observado en el presente estudio y de acuerdo con Alvarado y Forsythe (2005), el incremento se debe a la reducción de la actividad biológica, así como, de las distintas clases texturales, compactación, estructura y porcentaje de MO. Los valores de la DA varían de 0.59 y 0.86 g cm<sup>3</sup> y de acuerdo con Álvarez *et al.* (2008), estos valores se encuentran dentro del rango para suelos minerales (entre 0.5 y 1.8 g cm<sup>3</sup>). La baja densidad encontrada indica que el grado de compactación es bajo y por lo tanto, los suelos tienen adecuada aireación, drenaje y retención de humedad, favoreciendo así la estructura y la penetración del sistema radical.

La densidad real (DR) da una idea de la composición mineralógica del suelo, debido a que está es más o menos constante, se estima que la DR varía entre 2.6 y 2.7 g cm<sup>3</sup> (Thompson *et al.*, 1982). Para los suelos estudiados se encontraron valores mínimos y máximos de 1.7 y 2.56 g cm<sup>3</sup> respectivamente, esta disminución de la densidad real es debida a los altos contenidos de materia orgánica y al tipo de

material parental (riolita y tepojal). Por otra parte, el porcentaje de espacio poroso (EP) junto con la retención de humedad están estrechamente relacionados, ya que ésta última depende del tipo, número y distribución de los poros (macroporos encargados de la aireación y los microporos de la retención del agua), así como, de la superficie de cada suelo (Sánchez, 2007; Martínez *et al.*, 2008).

El porcentaje de EP en los suelos de la zona sobrepasa el 50 %, lo que significa que los suelos tienen una buena capacidad de infiltración y drenaje interno (Cuadro 11) lo cual concuerda con la clase textural encontrada (migajón-arenoso). La textura se caracteriza por ser una de las propiedades más estables, además de que permite inferir otras propiedades relacionadas con el uso y comportamiento del suelo (Ortíz, 2008). Las dos propiedades antes mencionadas junto con la DA, DR y la MO permiten un mejor crecimiento y desarrollo del sistema radical de las plantas.

Para el caso de la materia orgánica, se observó un amplio rango de 6 y 30% respectivamente, encontrándose el mayor porcentaje en los horizontes superficiales este comportamiento también fue observado por González *et al.* (1997), en su estudio en los suelos sobre serpentinas. Los altos contenidos de MO le proporcionan al suelo un color más oscuro, favoreciendo la absorción de los rayos solares y por tanto, el aumento de la temperatura beneficiando el crecimiento del sistema radical (Lambers *et al.*, 2002; Junk, 2002; McMichael y Burke, 2002). También influye en la formación de la estructura granulosa reduciendo la viscosidad de las arcillas e incrementado la aireación y drenaje, además la MO tiene una gran capacidad de retención de agua y reduce la evapotranspiración (Navarro y Navarro, 2003).

Martínez *et al.* (2008) mencionan que la materia orgánica afecta la reacción del suelo en los diversos grupos activos que aportan grados de acidez, esto explica los valores ácidos de pH encontrados (4.2 a 5.0), así como los exudados que producen las raíces los cuales acidifican su entorno (Walker *et al.*, 2003; Nueman y Römheld, 2002). En cuanto a la capacidad de intercambio catiónico, se mantuvo constante a lo largo del perfil, aumentando sus valores en los horizontes donde hay un incremento de arcilla (Cuadro 12), mismo patrón fue observado en el estudio realizado por Wang *et al.* (2004) en suelo de distintas coberturas vegetales. De acuerdo con Navarro y Navarro (2003), esto se debe a que las fracciones coloidales del suelo tienen la capacidad de retener cationes, los cuales, cuentan con gran superficie y elevada carga eléctrica favoreciendo el intercambio catiónico.

### **9.3. INTERFACE RAÍZ- SUELO**

De acuerdo a Johnson y Kuby (2004) y Pagano (2006) el coeficiente de correlación refleja la consistencia del efecto que el cambio en una variable tiene sobre otra, presentando valores de +1 a -1, el signo indica una asociación positiva o negativa y la parte numérica la magnitud de la correlación; con base a lo anterior, el análisis de correlación para las propiedades edáficas muestran una relación alta entre la DA y DR con el % de EP; la retención de humedad, CIC y CE con el pH, mientras que la MO con la DR y CIC (Cuadro 13), brindándole al suelo una mejor estructura y favoreciendo la

formación de agregados, así como la penetración de las raíces ayudando al asentamiento y desarrollo del bosque mesófilo de montaña. Pritchett (1990), Gregory (2006) y Zhou y Shangguan (2007) indican que las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos, tienen profundo efecto sobre la tasa de crecimiento de las raíces, así como, en el tipo y extensión de los sistemas radicales de la vegetación establecida, pero a su vez, las propiedades edáficas son modificadas por las raíces.

Pearsson (2007) menciona que la cuantificación de raíces finas en ecosistemas forestales es importante, debido al papel que desempeñan como sumideros de carbono y fuente de entrada de materia orgánica al suelo, ya que su crecimiento varía entre los distintos ecosistemas, especies vegetales, latitudes y condiciones climáticas.

En este estudio se encontró una mayor distribución de los grupos diamétricos: menores a 0.5, 0.6-1.0 y 1.1-2 mm, en el horizonte orgánico y dentro de los primeros 30 cm de profundidad del suelo mineral u horizonte A (Fig. 7), el contenido de raíces disminuye al aumentar la profundidad del suelo, mismo comportamiento fue observado en los trabajos realizados por Carvajal (2003), Uselman *et al.* (2007) y Huang *et al.* (2008), el primero para un bosque mesófilo de montaña de Costa Rica, el segundo en un bosque de cronosecuencia en California y el tercero para un matorral de arena en Mongolia. Esta tendencia en el sistema radical, se puede deber a que los procesos de mineralización son más activos en el mantillo y por tanto, la absorción y asimilación de agua y nutrientes en esta capa es más eficaz, función realizada principalmente por las raíces finas brindando una mayor estabilidad al bosque (Sierra *et al.*, 2001; Fitter, 2002; Purbopuspito *et al.*, 2002; Soethe *et al.*, 2006). Por otra parte, los grupos diamétricos de 2.1 -3 y > 3 mm tiene una distribución constante a lo largo del perfil de suelo (Fig. 4), ya que son las responsables del anclaje y soporte estructural de las plantas además son las proveedoras de la conducción de sustancias asimiladas por las raíces finas, las cuales desempeñan un papel clave en la capacidad de extraer los recursos del suelo, mismo que incrementa al aumentar la longitud de la raíz (Sierra *et al.*, 2001; Swamy *et al.*, 2003).

El aumento en la longitud radical, tanto en las capas superficiales como en los horizontes de acumulación (Fig. 5), concuerdan con los altos contenidos de MO obtenidos, observándose que el grupo diamétrico < 0.5 constituye el 59% de las raíces del suelo mineral, mientras que la capa de mantillo cuenta con el 91% de la misma clase radical; en la investigación realizada por Purbopuspito *et al.* (2002), la distribución radical de árboles de clavo, señala que las raíces menores a 1 mm de diámetro conforman el 72% de la longitud total del sistema radical. Vilche *et al.* (2001) y Li *et al.* (2010) mencionan que la materia orgánica estimula el aumento de la longitud del sistema radical fino, como respuesta a la absorción de nutrientes, lo cual coincide con las correlaciones encontradas entre longitud radical y la propiedad antes mencionada (Cuadro 13). Entre las propiedades que influyen en el arraigamiento radical, a través del impedimento físico y por su influencia en la aireación, se encuentran la textura y estructura, las cuales modifican los valores de DA, causando una disminución en el diámetro y en la distribución del sistema radical (Junk, 2002; Soethe *et al.*, 2006).

En el estudio realizado por Metcalfe *et al.* (2008) para una selva tropical del Amazonas, indica que la distribución, así como el área de superficie expuesta del sistema radical aumenta en la estación seca, siendo ésta última representada por las raíces finas con un 70-75%. En cuanto al área de superficie expuesta por las raíces, en este trabajo, se encontró que el 91 y 97% pertenecen a las raíces < 1 mm de diámetro en el suelo y mantillo respectivamente, observándose una diferencia del 16% entre los dos estudios, indicando que el mayor porcentaje encontrado en el presente trabajo tiene una alta relación con la obtención de los nutrimentos al tener un mayor contacto con las partículas del suelo (Hertel *et al.*, 2003; Jiménez *et al.*, 2004). También se puede observar que el comportamiento del área radical disminuye conforme aumenta la profundidad del suelo, observándose una mayor cantidad de ésta donde los contenidos de materia orgánica, densidad aparente, espacio poroso, humedad, cuentan con valores más altos. El análisis multivariado de varianza (MANOVA), para longitud y área de superficie expuesta no presentó diferencia significativa con la profundidad y el diámetro.

Los valores de biomasa obtenidos para el BMM estudiado, disminuyen al aumentar la profundidad en todos los grupos diamétricos (Fig. 7), lo cual coincide con lo reportado por Cavalier (1996), Jones *et al.* (2003) y Borken *et al.* (2007). A pesar de haber encontrado una mayor distribución y área de superficie expuesta para las raíces < 1 mm, los valores de biomasa obtenidos para esta clase diamétrica no sobrepasan los 56 Mg ha<sup>-1</sup> para el suelo, en cuanto a las raíces del horizonte orgánico la mayor biomasa la representan las raíces menores a 1 mm de diámetro (30.75 Mg ha<sup>-1</sup>; Cuadro 16). Para el caso de las raíces mayores a 3 mm, éstas cuentan con el mayor valor de biomasa para el suelo mineral con el 33%, mientras que el mantillo cuenta con el 5% (Fig. 11). Esta tendencia, fue observada en el trabajo realizado por Uselman *et al.* (2007), en el cual registró, que el 81 y 72% de las raíces finas se encuentran en mantillo y los primeros 30 cm de profundidad del suelo mineral, para bosques de 77 y 850 años respectivamente, cabe mencionar que en su estudio las raíces finas están conformadas por < 2 mm de diámetro. Igualmente Pavón y Briones (2000) reportan para un semidesierto de México el comportamiento antes descrito. Las diferencias de biomasa entre los estudios probablemente son debidos a la heterogeneidad de las plantas y del suelo mineral de los distintos bosques, las variaciones en la profundidad, concentraciones de nutrimentos en el suelo, así como, la topografía presente de cada sitio de estudio, lo cual concuerda con Jaramillo *et al.* (2003) y Röderstein *et al.* (2005).

La mayor cantidad de biomasa encontrada de raíces finas en el mantillo del BMM de Chicahuaxtla, se debe a que en el horizonte orgánico las condiciones son más favorables para el desarrollo de estas raíces, a su vez, éstas juegan un papel importante en los proceso biogeoquímicos (Fujimaki *et al.*, 2008), al acumular materia orgánica en los ecosistemas a lo largo del tiempo (Fonseca *et al.*, 2009). El análisis multivariado de varianza realizado para la biomasa del sistema, mostró diferencia significativa con la profundidad y diámetro, siendo en ésta última donde se obtuvo el valor más alto de variabilidad (Cuadro 17), Jaramillo *et al.* (2003), mencionan que en



el bosque tropical seco en Chamela, la profundidad no representa un factor importante en la distribución de la biomasa, porque una fracción de ésta se encontró a profundidades mayores, sin embargo, en el presente estudio esta propiedad resulta importante al ofrecer una idea de la profundidad en la que se concentra cada grupo diamétrico del sistema radical.

En resumen, las propiedades del suelo tanto físicas como químicas juegan un papel importante en la formación del ambiente edáfico, facilitando la penetración de las raíces. En este estudio se encontró que la aireación, la capacidad de drenaje y almacenamiento de agua, la plasticidad y retención de nutrimentos favorecen la penetración de las raíces, esto concuerda con lo reportado por Rucks *et al.* (2004). Como resultado de los procesos que actúan a través del tiempo y que son influenciados por el clima y topografía de la zona, a su vez el sistema radical constituye un fuerza estabilizadora y de cohesión, al producir exudados que adhieren las partículas del suelo, dando origen a una estructura favorable bien desarrollada y estable que aumenta la resistencia a la erosión (Pritchett, 1990; Baets *et al.*, 2008). De este modo y a medida que la vegetación alcanza el estado clímax, esta influye en el entorno edáfico acondicionándolo para sí, de manera que los procesos ecosistémicos tienen lugar de manera más eficiente entre el suelo y los componentes de la vegetación y entre estos y la comunidad edáfica (Neher, 1999; Carney y Matson; 2005; Osler, 2007).

#### **9.4. RELACIÓN DE NUTRIMENTOS ENTRE MANTILLO–SUELO–RAÍZ**

##### **9.4.1 Nitrógeno**

Los valores de N del horizonte orgánico, se mantienen constantes para el BMM estudiado (Cuadro 18), Warren y Zou (2002) igualmente reportaron que el contenido de nitrógeno no cambia en la capa de mantillo en un bosque subtropical húmedo de Puerto Rico, lo cual sugiere que éste nutrimento permanece en una forma inmovilizada en el horizonte O. En diversos trabajos se ha encontrado que el nitrógeno en el suelo orgánico se encuentra entre el 1–2% (Blair 1982; Wood *et al.*, 2006; Fang *et al.*, 2011); por otra parte, Campos *et al.* (2007), encontraron que en bosques tropicales secos de Yucatán, el mantillo contiene altos valores de nitrógeno en la estación húmeda (13.7 mg g<sup>-1</sup>), con base en este hallazgo Fang *et al.* (2011) señalan que cuando la temperatura, humedad y otros factores ambientales son constantes, la relación C/N de los horizontes es dominante en el control de la mineralización del N y nitrificación. Yermakov y Rothstein (2006), sugieren que la disponibilidad de este nutrimento se incrementa, donde hay una mayor acumulación de materia orgánica; de esta forma se explican los altos contenidos encontrados de nitrógeno en la capa de mantillo del BMM estudiado. La descomposición y mineralización de la materia orgánica, están estrechamente relacionadas con los ciclos de nutrimentos, la cual es controlada por los microorganismos, la calidad del mantillo, así como por las propiedades edáficas del suelo, afectando la liberación de los nutrimentos disponibles para las plantas (Vargas *et al.*, 2005; Goya *et al.*, 2008; Sale y Agbidey, 2011).

Para el caso del nitrógeno del suelo mineral, se obtuvieron valores heterogéneos entre los perfiles realizados, encontrándose contenidos mínimos y máximos de 0.8 - 10% respectivamente en las capas superficiales del suelo (Cuadro 18), los cuales decrecen al aumentar la profundidad del suelo, este mismo patrón lo reportaron Göransson *et al.* en 2007. La estrecha relación entre el N y MO es apreciable al obtener una correlación del 0.95, también se obtuvo buena correlación con las propiedades: DR, pH activo, CIC, y con los nutrimentos P y K, datos que se pueden observar en el Cuadro 20. Goya *et al.* (2008) señalan que suelos arcillosos con altos contenido de bases, pH y retención de humedad ayudan en la descomposición de la materia orgánica y por tanto la obtención de recursos para las especies vegetales, con base en lo anterior, se puede deducir que los contenidos de nitrógeno disminuyen a lo largo del perfil al no encontrar las condiciones adecuadas ya que los suelos de la zona de estudio son muy ácidos, limitando así la disponibilidad de este nutrimento, por la pérdida de  $\text{NO}_3^-$  por lixiviación al ser muy soluble en agua y la inmovilización del N por microorganismos (Plascencia y Corbella, 2011), además que el contenido de nitrógeno se reduce al aumentar la altitud, pues disminuye la temperatura y microorganismos del suelo, factores importantes en la descomposición y mineralización de la MO (Jenny, 2005).

Maycock y Congdon (2000) y Wu *et al.* (2001), mencionan que las raíces finas son un componente importante en los ciclos biogeoquímicos de los bosques, ya que juegan un papel importante en la conservación y retorno de los nutrimentos, además, Hendrick y Pregitzer (1992) señalan que la cantidad de N agregado por las raíces es de 18 a 58% mayor que el aportado por la caída de hojarasca en algunos ecosistemas. Lo descrito anteriormente, concuerda con lo obtenido para el BMM estudiado, ya que poco más del 30% de N se encontró en las raíces menores de 1 mm de diámetro, mientras que las raíces con diámetro superior a 3 mm no sobrepasan el 3% en lo que se refiere a las raíces encontradas en el mantillo. Para el caso de las raíces del suelo mineral se encontró una concentración del 3 y 4% de nitrógeno en las clase diamétricas menores que 0.5 y 0.6-1.0 mm respectivamente y un 2% en el sistema radical mayor a 3 mm (Cuadro 22 y Fig. 13a).

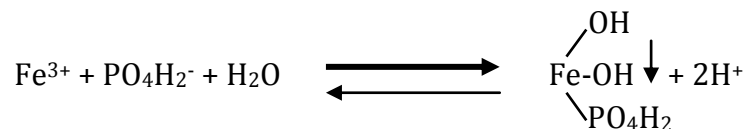
Este comportamiento también fue observado en el trabajo realizado por Gordon y Jackson (2000) y de acuerdo con Blom *et al.* (2003), este patrón se debe a que las raíces finas son las encargadas de absorber y asimilar el N requerido para la división celular; también señala que sí el sistema radical se encuentra expuesto a altas concentraciones de  $\text{NO}_3^-$ , este sirve como una señal en el desarrollo y elongación de las raíces laterales duplicando su longitud; explicando así, porque se encontraron valores altos de longitud, área de superficie radical y N en los almacenes de mantillo y en las capas superficiales del suelo mineral analizado.

#### **9.4.2. Fósforo**

Las concentraciones de fósforo total en la capa de mantillo se mantienen constantes en los cinco sitios con una media de  $8.6 \text{ cmol kg}^{-1}$  (Cuadro 18), valores semejantes a los encontrados en este estudio, fueron mencionados por Campo *et al.* (2007), cuyas

concentraciones en los dos estudios, son clasificados como bajos de acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2002. Los bajos contenidos de P se deben principalmente a la calidad de la materia orgánica del sitio, así como de las propiedades edáficas que se han descrito anteriormente. Otros factores que influyen en la disponibilidad del fósforo son, el sistema radical y las comunidades de microorganismos que se encuentran en el horizonte O y suelo mineral, debido a que juegan un rol importante en la descomposición de la MO, en el ciclo de nutrientes, pues la mineralización del P se logra principalmente a través de la catálisis por la fosfatasa ácida, la cual es excretada por los microorganismos y raíces (Janasson *et al.*, 2006; Murphy *et al.*, 2007).

Los valores de fósforo en el suelo para el Cambisol se consideran bajos, mientras que, los contenidos en Leptosol y Regosol se clasifican como altos y medios de acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2002 (Cuadro 19). Esta diferencias en los valores de P en el BMM estudiado, se debe a los distintos tipos de suelo que se encontraron y a que poseen diferentes propiedades entre ellos, lo cual concuerda con Wood *et al.* (2006), sin embargo, los factores que tiene una mayor influencia en la disponibilidad de este nutriente son: la MO y pH. Éste último condiciona las reacciones que controlan las formas asimilables del fósforo para las plantas, pues a pH de 9 el  $\text{PO}_4\text{H}_2^-$  se encuentra en su mayor concentración, mientras que, a pH ácidos las cantidades de  $\text{PO}_4\text{H}_2^-$  son superiores, por último a pH neutros las dos formas se hallan en equilibrio (Navarro y Navarro, 2003). Cabe mencionar que entre mayor sea la acidez del suelo la disponibilidad de  $\text{Fe}^{3+}$  y  $\text{Al}^{3+}$  aumentan, reaccionando con el  $\text{PO}_4\text{H}_2^-$  precipitándolo y originando compuestos insolubles de fósforo para la planta, de acuerdo con la reacción:



Por otra parte Ramesh *et al.* (2004) y Janasson *et al.* (2006) indican que en suelos con altos contenidos de materia orgánica, el P orgánico puede constituir hasta un 50% del total de P soluble disponible en el suelo, debido a que los microorganismos fosfato-solubilizantes, tienen la capacidad de reducir el pH mediante la liberación de ácidos orgánicos como: acetato, lactato, tartrato, entre otros. Conforme a lo expuesto, la baja disponibilidad de fósforo en el Cambisol se debe a los valores ácidos de pH registrados para estos tipos de suelos, con respecto al Regosol y Leptosol estos cuentan con pH cercanos a la neutralidad y contenidos de MO altos, causando que la disponibilidad de P incremente en estos suelos. Esta estrecha relación del P con el pH se confirmó al realizar el análisis de correlaciones y obtener valores cercanos a 1 entre estas dos variables (Cuadro 20).

Los más altos contenidos de P en el tejido radical de los horizontes orgánico y mineral, se encontraron en las raíces de los grupos diamétricos menores a 0.5, 0.6-1.0 y 1.1-2 mm (Fig. 13b). En el estudio realizado por Gordon y Jackson (2000), igualmente señalan mayores concentraciones de P en las raíces menores a 2 mm. Dada la baja disponibilidad y movilidad del P en la mayoría de los suelos, el sistema

radical ha desarrollado estrategias para explorar eficazmente el ambiente edáfico, al mostrar una gran variedad de adaptaciones entre las que se encuentra la simbiosis con micorrizas, modificación de la rizosfera a través de secreción de ácidos orgánicos, protones y fosfatasas, así como el alargamiento y proliferación de los pelos radicales (Lynch y Brown 2008), consiguiendo una área de superficie mayor para interceptar las formas disponibles del nutrimento, razón por la cual en este estudio se encontró una mayor extensión y área de superficie.

#### 9.4.3. Potasio

Al igual que para N y P en matillo, los valores de K se mantienen constantes en los cinco sitios, con una concentración media de 467 mg kg<sup>-1</sup>. Wood *et al.* (2006) reportan valores de 2100-3300 mg kg<sup>-1</sup> para este horizonte en ecosistemas tropicales. De acuerdo a Berian *et al.* (1985), Prause *et al.* (2003) y Bosco *et al.* (2004), los mayores aportes de K en la capa de matillo corresponden principalmente a la calidad de sus componentes (hojas, ramas, frutos y corteza), siendo las hojas los órganos que tienen una mayor influencia en la disponibilidad del potasio, pues su descomposición es mucho más rápida y posee grandes cantidades de éste nutrimento. Otra fuente de potasio, es la trascolación del dosel y la escorrentía cortical, ya que al ser un catión muy móvil (K<sup>+</sup>) y no formar parte estructural de la planta, este se disuelve fácilmente con el agua.

El potasio presente en el suelo mineral, se debe principalmente a la desintegración y descomposición de las rocas que contienen minerales potásicos. Es el nutrimento con menores problemas de disponibilidad al encontrarse en el suelo con un mínimo y máximo de 50 y 300 mg kg<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O respectivamente (Navarro y Navarro, 2003). Para el caso de los valores de potasio encontrados en el suelo, estos oscilan entre 10 y 162 kg<sup>-1</sup> para el BMM estudiado. Gómez-Borges *et al.* (2005) señalan que entre las propiedades que afectan la distribución del potasio en el suelo se encuentran el contenido y tipo de arcilla, humedad, temperatura y pH.

Con base en lo expuesto se deduce que las cantidades de potasio registradas para este estudio son superiores a otros trabajos, debido a que en el BMM se registra una precipitación media anual de 1000-3000 mm (INEGI, 2007) y generalmente hay presencia de neblina, ocasionando trascolación y escorrentía cortical disolviendo así al K que se encuentra en las hojas y tallos, llegando al horizonte O y posteriormente al suelo mineral por lixiviación, además, se obtuvieron valores medios de arcilla, haciendo que la débil retención de cationes K<sup>+</sup> en la superficie del coloide libere más fácilmente al nutrimento (Gómez-Borges *et al.*, 2005), lo cual concuerda con los valores de CE y CIC, además el análisis de correlaciones que se realizó también muestra una gran relación entre estas propiedades y el contenido de K (Cuadro 19). Bugarín *et al.* (2007) menciona que el limo ayuda a aumentar la disponibilidad de éste nutrimento y en el presente trabajo se encontraron valores altos de limo con respecto a la arcilla, ésta podría ser un razón más, del porque los contenidos de K son mayores en el suelo mineral.

Por otra parte se observó que el sistema radical presente en el suelo mineral muestra una concentración mayor del potasio en las clases diamétricas 2.1-3 y mayores a 3 mm, mientras que para las raíces del horizonte orgánico los mayores contenidos de K se registran en los grupos de 1.1-2 mm de diámetro. Gordon y Jacson (2000) indican que las raíces finas (menores a 2 mm) presentan contenidos de 26 mg kg<sup>-1</sup> y al compararlo con los resultados de este estudio se nota un comportamiento similar, ya que si tomáramos en cuenta los tres grupos diamétricos que constituyen a las raíces menores de 2 mm, sus concentraciones serían más altas a los grupos de 2.1-3 y mayores a 3 mm de diámetro, tanto para las raíces del suelo como de mantillo. Bosco *et al.* (2004) mencionan que las mayores concentraciones de N, P y K se encuentran en las hojas seguidas de las raíces finas, reflejando así la importancia de estos nutrimentos en el metabolismo. Es el potasio quien actúa en la activación de alrededor de 50 enzimas (sintetasa, deshidrogenasa, reductasa, quinasa, entre otras), además, está involucrado en la síntesis de proteínas (Arruda y Malavolta, 2001).

#### 9.4.4. Hierro

En los cinco sitios estudiados la concentración media de hierro en mantillo no sobrepasa los 0.3 g kg<sup>-1</sup> (Cuadro 18). En el estudio realizado por Xu *et al.* (2010) muestran contenidos de hasta 0.213 g kg<sup>-1</sup> de este nutrimento para un bosque de pino, por otra parte, al hacer la comparación de estos dos estudios con los resultados obtenidos por Gerding y Thiers (2002) en un bosque de *Nothofagus betuloides*, éste último presenta valores muy superiores de Fe (1.36 g kg<sup>-1</sup>), lo cual se podría deber a las distintas especies vegetales presentes en los estudio, pues Navarro y Navarro (2003) menciona que las concentraciones de hierro varían en las distintos tipos de vegetación, así como en las estructuras de la planta, las raíces y hojas son las estructuras que presentan los contenidos más altos. Otro factor importante en la liberación de hierro disponible es la presencia de microorganismos pues estos al producir agentes quelantes oxidan el nutrimento dejándolo disponible (Mendoza *et al.*, 2005; Kidanu *et al.*, 2009; Lemanceau *et al.*, 2009 y Dubinsky *et al.*, 2010).

De acuerdo con Navarro y Navarro (2003) y Acevedo-Sandoval *et al.* (2004) los contenidos de Fe en el suelo mineral oscilan entre 10 y 50 g kg<sup>-1</sup>, sin embargo, el hierro intercambiable se encuentra entre 0.1-100 g kg<sup>-1</sup> y el soluble entre 0.1-25 mg L<sup>-1</sup>, dependiendo del tipo de suelo y material parental. En el presente estudio se encontraron valores de hierro mínimos y máximos de 0.6 y 10 g kg<sup>-1</sup> respectivamente, mismos que entran en el rango antes mencionado. El Fe desempeña un papel importante en el suelo participando en varias reacciones, afectando las propiedades edáficas y éstas a su vez en la nutrición de las plantas (Navarro y Navarro, 2003; Lemanceau *et al.*, 2009). Entre las propiedades que afectan más la disponibilidad del hierro se encuentran: el pH, ya que a valores ácidos aumenta la disponibilidad del nutrimento; la MO pues tiene como característica acidificar su entorno, así como de formar quelatos de Fe con ayuda de algunas sustancias húmicas (Navarro y Navarro, 2003); y por último la arcilla, en donde son retenidos los óxidos de hierro incrementando su carga eléctrica (Acevedo-Sandoval *et al.*, 2004).

Con base en lo expuesto, en el presente estudio se tiene que los contenidos de Fe son mayores para los horizontes superficiales, lo cual se debe a los altos contenidos de MO, mismos que estimulan la actividad microbiana, aumentando la disponibilidad de este nutrimento, por otra parte, al aumentar la profundidad del perfil estas propiedades disminuyen ocasionando que la disponibilidad del hierro se reduzca. A pesar de que en los sitios de estudio se presentan valores medios de arcilla y pH ácidos, mismos que favorecen los contenidos de Fe en el suelo, éstos se ven limitados, lo cual se podría deber a que forma compuestos insolubles con el fósforo, los cuales tienden a precipitar disminuyendo tanto la disponibilidad del Fe como del P.

Con respecto al sistema radical se obtuvo una tendencia a disminuir los contenidos de Fe a medida que aumenta el diámetro radical, tanto para las raíces presentes en el mantillo y las del suelo mineral (Fig. 13e), pues de acuerdo con Acevedo-Sandoval *et al.* (2004) el hierro es absorbido por las raíces en forma activa como  $Fe^{2+}$  y  $Fe^{3+}$ , o como quelato, el cual se transporta vía xilema, además Navarro y Navarro (2003) menciona que las mayores concentraciones de Fe se presentan en las regiones meristemáticas, ya que este nutrimento es requerido por las enzimas mitocondriales, por esta razón las mayores concentraciones se encontraron en las raíces menores a 0.5 mm de diámetro.

#### 9.4.5. Azufre

Es importante señalar que pocos estudios han considerado la dinámica del S en mantillo en ecosistemas forestales, debido a la alta complejidad de sus reacciones, de ahí, la escasa información que se tiene sobre este nutrimento.

La concentración media de azufre en la capa de mantillo para el BMM estudiado, es de  $738 \text{ mg kg}^{-1}$ . Ukonmaanaho *et al.* (2008) indica valores entre 450 y  $1320 \text{ mg kg}^{-1}$  en bosques de pino y abeto, mientras que, Wood *et al.* (2006) muestran valores de  $1800 \text{ mg kg}^{-1}$  para un bosque húmedo tropical. Las distintas concentraciones de S en los trabajos corresponden principalmente a la vegetación de cada estudio, dando como resultado distintas calidades de mantillo. De acuerdo con Johnson (1984) y Navarro y Navarro (2003) el azufre se encuentra principalmente en suelos de zonas húmedas, debido a que la presencia de los restos vegetales aumenta en estos ecosistemas, el cual debe ser mineralizado por los microorganismos edáficos a  $SO_4^{2-}$  y así poder ser asimilado por las plantas.

El azufre disponible en suelos forestales se obtiene del material parental, la descomposición de la MO y la precipitación atmosférica (Navarro y Navarro, 2003; Sokolova y Alekseeva, 2007). En el suelo mineral estudiado se encontraron valores de azufre entre 300 y  $800 \text{ mg kg}^{-1}$  (Cuadro 19), estas diferencias en los contenidos de azufre a lo largo del perfil del suelo se deben principalmente, al tipo de suelo, pH, MO, y contenido de arcilla (Watwood, 1988; Alves y Laorety, 2003). Esta última, proporciona una superficie de adsorción para el azufre por ello los contenidos de S aumentan principalmente en el horizonte de acumulación, además el contenido de arcilla acidifica al suelo, ocasionando que los valores de pH sean bajos, influyendo en

la adsorción del sulfato, pues de acuerdo a Nodvin *et al.* (1986) y Sokolova y Alekseeva (2007), al aumentar la acidez del suelo la adsorción del sulfato igualmente incrementa, teniendo su máximo en un pH= 4, comportamiento que fue observado en el Cambisol ya que este suelo presenta valores altos de acidez.

Por último, las concentraciones de azufre en las raíces se mantienen entre 800 y 1000 mg kg<sup>-1</sup>, encontrándose los contenidos más altos en las clases diamétricas de 0.6-1.0 y menores a 0.5 mm para el caso de las raíces del suelo, mientras que, en las de mantillo los valores más altos pertenecen a las raíces de 1-2mm, seguidas de las 0.6-1.0 y menores 0.5 mm de diámetro. Los altos contenidos en el sistema radical fino en el presente estudio se puede deber a que el azufre (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) como nutrimento en las plantas, esta determinada principalmente por la capacidad de absorción de las raíces y por la asimilación de los tejidos en crecimiento, así como, la asociación entre las ectomicorrizas con el sistema radical, ya que optimizan la captación de azufre reducido, aumentando la síntesis de proteínas y el transporte de sulfato del xilema a las hojas mejorando el crecimiento vegetal (Ramesh *et al.*, 2004).

## X. CONCLUSIONES

La nutrición de la vegetación del BMM estudiado, depende de la capa de mantillo y primeros 20 cm de suelo, al encontrarse aquí el 80% del sistema radical fino y los más altos contenidos de nutrimentos.

En el horizonte orgánico se encontró únicamente sistema radical fino estas son las raíces que estratégicamente construye la vegetación para interceptar nutrimentos del mantillo a medida que la mineralización tienen lugar.

En el BMM de montaña de San Andrés Chicahuaxta el horizonte orgánico juega un papel importante en el mantenimiento de la productividad primaria al proporcionar la mayor cantidad de agua, fósforo y nitrógeno disponibles para los organismos.

Los procesos de mineralización son más activos en el mantillo y en las capas más superficiales del suelo mineral debido a los altos contenidos de MO, dejando disponible los nutrimentos, donde son absorbidos principalmente por las raíces con diámetro menor a 2 mm.

La disponibilidad de nutrimentos en el bosque estudiado, están influenciados principalmente por la textura, humedad, MO, pH, así como de la calidad de mantillo, microorganismos presentes y estrategias desarrolladas por las raíces.

Cuanto más pequeño es el diámetro del sistema radical, mayor es el contenido de los nutrimentos N, P, K, Fe y S por unidad de masa.

Las raíces mayores a 2.1 mm de diámetro constituyen aproximadamente el 50% de la biomasa del sistema radical de la comunidad vegetal.

La heterogeneidad topográfica presente en el sitio de estudio, así como, de las variaciones del clima, material parental y altitud, originan el desarrollo de suelos Cambisol, Leptosol y Regosol.

La pedregosidad, textura, materia orgánica, pH y disponibilidad de nutrientes determina la distribución del sistema radical.

La relación entre la densidad aparente, porosidad, retención de humedad, textura y materia orgánica le brindan al suelo una buena estructura, aireación, infiltración y drenaje interno favoreciendo la penetración y crecimiento del sistema radical fino, ayudando al asentamiento y desarrollo de la vegetación.

En el fragmento de bosque mesófilo de montaña las especies vegetales dominantes son las que aportan la mayor biomasa al bosque.

La alta heterogeneidad y diversidad en la composición florística indican el buen estado de conservación del BMM de San Andrés Chicahuaxtla.



## LITERATURA CITADA

- Abreu, C. A., van, R. B., Abreu, M. F. y Paz, G. A. 2004. Avaliação da disponibilidade de manganês e ferro em solos pelo uso do método modificado da resina de troca iônica. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* **28**: 579-584.
- Acevedo-Sandoval, O., Ortiz-Hernández, E., Cruz-Sánchez, M. y Cruz-Chávez, E. 2004. El papel de óxidos de hierro en suelos. *Terra Latinoamericana* **22** (4): 485-497.
- Aguilar, A. J. L., Martínez, H. J., Volke, H. V. Etchevers, B. J., Mata, V. H. y Hernández, M. M. 2006. Distribución del Fósforo en Suelo, Raíces y Materia Seca de Tubérculos de Papa Cultivada con Fertirriego. *Terra Latinoamericana* **24**(2): 269-276.
- Alvarado, A. y Forsythe, W. 2005. Varación de la densidad aparente de suelos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* **29**(001): 85-94.
- Álvarez, A., G., García, C. N. E., Krasilnikov, P. V., Sedov, S. N., Targulian, V. O. y 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.
- Alves, M. E., Lavorenti, A. 2003. Sulfate adsorption and its relationships with properties of representative soils of the Sao Paulo State, Brazil. *Geoderma* **118**: 89-99.
- Arruda, S. R., y Malavolta, E. 2001. Nutrição e adubação potássica em Eucalyptus. *Agronómicas, POTAFOS* **91**:1-10.
- Bae, P. B., Yanai, R. D., Fahey, T. J., Bailey, S. W., Siccama, T. G., Shanley, J. B. y Cleavitt N. L. 2008. Fine root dynamics and forest production across a calcium gradient in Northern Hardwood and conifer ecosystems. *Ecosystems* **11**: 325-341.
- Baets, S. D., Torri, D., Poesen, J., Salvador, M. P. y Meersmans, J. 2008, Modelling increased soil cohesion due to roots with EUROSEM. Earth Surf. Process. *Landforms* **33**: 1948-1963.
- Barreto, S. L. H. y León, P. J. D. 2005. Masa total y contenido de nutrientes en raíces finas de Ecosistemas Forestales (*Pinus patula* Schltdl & Cham. *Cupressus lusitanica* Mill y *Quercus humboldtii* Bonpl.) de Piedras Blancas, Antioquia-Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín* **58**(2): 2907-2929.
- Bautista-Zúñiga, F., Jiménez-Osornio, J., Navarro-Alberto, J., Manu, A. y Lozano, R. 2003. Microrelieve y color del suelo como propiedades de diagnóstico en Leptosoles cársticos. *Terra Latinoamericana* **21**(1): 1-11.
- Becerra, L. N., Barrera, T. E., Marquínez, C. X. 2002. Anatomía y Morfología de los Órganos Vegetativos de las Plantas Vasculares. Universidad Nacional de Colombia. Ed. Universidad Nacional de Colombia, 276 pp.
- Beck, E., Bendix, J., Kottke, I., Makeschin F., Mosandl, R. 2008. Gradients in a tropical mountain ecosystem of Ecuador. Ecological Studies, Vol. 198, Springer, Berlin, 542 pp.
- Berian, E. A., Criado, G. B. y Peloché A. H. 1985. El Ciclo del Potasio en Dehesas de *Quercus rotundifolia* y *Quercus pyrenaica*. *Mediterránea Serie de Estudios Biológicos*. **8**: 103-123.
- Black, C. 1975. Relaciones Suelo-planta. Trad. por Armando Rabuffetti. Iowa, Hemisferio Sur. Tomo II. 866 pp.

- Blair, J. M. 1988. Nitrogen, sulfur and phosphorus dynamics in decomposing deciduous leaf litter in the Southern Appalachians. *Soil Biology and Soil Biochemistry* **20**(5): 693-701.
- Blomme, G., Swennen, R., Tenkouano, A., Ortiz, R. y Vuylsteke, D. 2001. Estimación del desarrollo de las raíces a partir de los caracteres de los brotes en banano y plátano (*Musa* spp.). *INFOMUSA* **10**(1): 14-17.
- Bloom, J. A., Meyerhoff, A. P., Taylor R. A. y Rost L. T. 2003. Root Development and Absorption of Ammonium and Nitrate from the rhizosphere. *Journal of Plant Growth Regulation* **21**: 416-431.
- Borges-Gómez, L., Escamilla-Bencomo, A., Soria-Fregoso, M., Casanova-Villareal, V. 2005. Potasio en suelos de Yucatán. *Terra Latinoamericana* **23**(4): 437-445.
- Borken, W., Kossmann, G. y Matzner, E. 2007. Biomass, morphology and nutrient contents of fine roots in four Norway spruce stands. *Plant Soil* **292**: 79-93.
- Bosco, I. J., Blanco, J. A. y Castillo, F. J. 2004. Gestión forestal y ciclos de nutrientes en el marco del cambio global. Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante. Ministerio de Medio Ambiente, EGRAF, S. A., Madrid, p. 479-506
- Bouyoucos G. J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soil. *Agronomy Journal* **54**: 464-465.
- Bugarín, M. R., Galvis, S. A., Hernández, M. T.M. y García, P. D. 2007. Capacidad amortiguadora y cinética de liberación de potasio en suelos. *Agricultura Técnica en México* **33**(001): 72-81.
- Campo, J., Solís, E. y Valencia M. G. 2007. Litter N and P dynamics in two secondary tropical dry forests after relaxation of nutrient availability constraints. *Forest Ecology and Management* **252**: 33-40.
- Carney, K. M. y Matson, P. A. 2005. Plant Communities, Soil Microorganisms, and Soil Carbon Cycling: Does Altering the World Belowground Matter to Ecosystem Functioning? *Ecosystem* **8**: 928-940.
- Cartujano, S., Zamudio, S., Alcántara, O. y Luna, I. 2002. El bosque mesófilo de montaña en el municipio de Landa Matamoros, Querétaro, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* **70**: 13-43.
- Carvajal, S. A. 2003. Distribución de raíces finas en suelos del bosque nuboso y pastos, en Monteverde, Costa Rica. Informe de Práctica de especialidad para optar por el grado de Bachiller en Ingeniería Forestal. San José, Costa Rica 78 pp.
- Challenger, A. 2003. Conceptos generales acerca de los ecosistemas templados de montaña de México y su estado de conservación. En Sánchez, O., Vega, E., Peters, E. y Monroy-Vilchis, O. (Eds.). Conservación de ecosistemas templados de montaña en México (p. 17-44). México, D.F: Instituto Nacional de Ecología.
- Cotler, A. H. 2003. Características y manejo de suelos en ecosistemas templados de montaña. En Sánchez, O., Vega, E., Peters, E. y Monroy-Vilchis, O. (Eds.). Conservación de ecosistemas templados de montaña en México (p. 153-161). México, D.F: Instituto Nacional de Ecología.

- Cuanalo, C. H. E. 1975. Manual para la descripción de perfiles de suelo en el campo. Colegio de Posgraduados. ENACH. Chapingo, México.
- Diario Oficial de la Federación. 2003. Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. México, D. F.
- Doll, Ú., Vallejos, O., Bilbao, N. y Jara, C. 2008. Estimación preliminar de la retención de carbono en raíces finas y mantillo de un renoval de *Nothofagus glauca* de la precordillera andina de la Región del Maule, Chile. *Bosque* **29**(1): 91-96.
- Donoso, C. 1997. Ecología Forestal; El bosque y su medio ambiente. 5 ed. Santiago Chile, Universitaria. 367 pp.
- Dubinsky, E. A., Silver, L. W. y Firestone, M. K. (2010). Tropical forest soil microbial communities couple iron and carbon biogeochemistry. *Ecology* **91**(9): pp. 2604–2612.
- Esau, K. 1985 Anatomía vegetal. 3ª edición, Ediciones Omega, Barcelona, España, 729 pp.
- Escamilla, A., Quintal, F., Medina, F. Guzmán, A., Pérez, E. y Calvo, L. Ma. 2005. Relaciones suelo-planta en ecosistemas naturales de la Península de Yucatán: comunidades dominadas por pal mas, p. 159 - 172. En: Bautista, F. y Palacio, G. (Eds.) Caracterización y Manejo de los Suelos de la Península de Yucatán: Implicaciones Agropecuarias, Forestales y Ambientales. Universidad Autónoma de Campeche, Universidad Autónoma de Yucatán. 282 p.
- Fang, H., Yu, G., Cheng, S., Zhu, T., Zheng, J., Mo, J., Yan, J. y Luo Y. (2011). Nitrogen-15 signals of leaf-litter-soil continuum as a possible indicator of ecosystem nitrogen saturation by forest succession and N loads. *Biogeochemistry* **102**: 251-263.
- FAO, 2002. Los fertilizantes y su uso. Una guía de bolsillo para los oficiales de extensión, 4a Edición, Asociación Internacional de la industria de los Fertilizantes, p. 12-15.
- Fisher, R. y Binkley, D. 2000. Ecology and management of forest soils. 3 edic. New York, USA. 489 pp.
- Fitter, A. H. 2002. Characteristics and functions of root systems. En: Waisel Y, Eshel A, Uzi Kafkafi U (Ed.). Plant roots: the hidden half, 3rd ed. Marcel Dekker, Inc., New York, p. 15–32.
- Fonseca, G. W., Alice, G. F. y Rey, B. J. M. 2009. Modelos para estimar la biomasa de especies nativas en plantaciones y bosques secundarios en la zona Caribe de Costa Rica. *Bosque* **30**(1): 36-47.
- Forsythe, W. 1985. Física de suelos manual de laboratorio, editl. IICA, Costa Rica, 39 pp.
- Fu, B. J., Liu, S. L., Ma, K. M. y Zhu, Y. G. 2004. Relationships between soil characteristics, topography and plant diversity in a heterogeneous deciduous broad-leaved forest near Beijing, China. *Plant and Soil* **261**: 47-54.
- Fuentes, Y. J. L., 2001. Iniciación a la botánica, edic. Mundi-Prensa, Madrid, España, p. 41-44
- Fujimaki, R., Takeda, H. y Wiwatiwitaya, D. 2008. Fine root decomposition in tropical dry evergreen and dry deciduous forest in Thailand. *Journal of Forest Research* **13**: 338–346.

- Gerding, V. y Thiers, O. 2002. Caracterización de suelos bajo bosques de *Nothofagus betuloides* (Mirb) Blume, en Tierra del Fuego, Chile. *Revista Chilena de Historia Natural* **75**: 819-833.
- Göransson, H., Ann-Mari, F. y Jönsson-Belyazid, U. 2007. Do oaks have different strategies for uptake of N, K and P depending on soil depth? *Plant Soil* **297**: 119-125.
- Gordon, W. S. y Jackson, R.B 2000. Nutrient concentrations in fine roots. *Ecology* **81**(1): 275-280.
- Goya, J. F., Frangia, J. L., Pérezza, C. y Dalla, T. F. 2008. Decomposition and nutrient release from leaf litter in Eucalyptus grandis plantations on three different soils in Entre Ríos, Argentina. *BOSQUE* **29**(3): 217-226.
- Gregory, P. J. 2006. Plant roots: growth, activity, and interaction with soils. Blackwell Publishing, India, 318 pp.
- Gutiérrez, C., Bautista, C. A., del Castillo, R. F. 2003. Patrones de desarrollo del suelo asociados con sucesión secundaria en un área originalmente ocupada por bosque mesófilo de montaña. *Ecosistemas* **3**(1):1697- 2473.
- Hendrick, R. L. y Pregitzer, K. S. (1992). The demography of fine roots in a Northern Hardwood. *Ecology* **73**(3): 1094-1104.
- Hertel, D., Leuschner, C. y Hölscher, D. 2003. Size and structure of fine root systems in old-growth and secondary Tropical Montane Forests (Costa Rica). *Biotropica* **35**(2): 143-153.
- Hishi, T. y Takeda, H. 2005. Life cycles of individual roots in fine root system of *Chamaecyparis obtuse* Sieb. et Zucc. *Journal of Forest Research* **10**: 181-187.
- Huang, G., Xue-yong, Z., Yan-gui, S., Ha-lin, Z. y Tong-hui, Z. 2008. Vertical distribution, biomass, production and turnover of fine roots along a topographical gradient in a sandy shrubland. *Plant Soil* **308**: 201-212.
- INE, 2006. Manual de técnicas de análisis de suelos aplicadas a la remediación de sitios contaminados, Instituto nacional de Ecología, D. F., México.
- IUSS Grupo de Trabajo WRB. 2007. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Primera actualización 2007. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. FAO, Roma.
- Jackson, M. L. 1982. Análisis Químico de Suelos. Omega. 4ª edición. Barcelona, España. 662 pp.
- Jaramillo, V. J., Boone, K., J., Rentería-Rodríguez, L., Cummings, D. L. y Ellingson, L. J. 2003. Biomass, Carbon, and Nitrogen pools in Mexican Tropical Dry Forest Landscapes. *Ecosystem* **6**: 609-629.
- Javier, S. V. 2007. Fertilidad del suelo y nutrición mineral de plantas. FERTITEC S.A.
- Jenny, H. 2005. Factors of soil formation: a system of quantitative pedology. Soil and Health Library, Exeter, Tasmania, Australia. 191pp.
- Jiménez, R. J. y Arias, A. D. 2004. Distribución de la biomasa y densidad de raíces finas en una gradiente sucesional de bosques en la Zona norte de Costa Rica. Investigación realizada con apoyo de la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del Instituto Tecnológico de Costa Rica, dentro del programa de Proyectos estudiantiles.

- Johnson, D. W. 1984. Sulfur cycling in forests. *Biogeochemistry* **1**(1): 29-43.
- Johnson, R. y Kuby P. 2004. Estadística Elemental: lo esencial. International Thomson Editores, México, D.F., 509 pp.
- Jonassona, S., Castroa, J. y Michelsen, A. 2006. Interactions between plants, litter and microbes in cycling of nitrogen and phosphorus in the arctic. *Soil Biology y Biochemistry* **38**: 526-532.
- Junk, A. 2000. Nutrient movement at the soil-root interfaces its role in nutrient supply to plants. *Ciencia del suelo y nutrición vegetal* **1**(1): 1-18.
- Junk, A. O. 2002. Dynamics of nutrient movement at the soil-root interface. En: Waisel Y, Eshel A, Uzi Kafkafi U (Eds.) *Plant roots: the hidden half*, 3rd ed. Marcel Dekker, Inc., New York, p. 587-616
- Kidanu, Y., Mulatu D. y Tessema, D. A. 2009. Mobilization of iron from soil recalcitrant fractions by using mango (*Mangifera indica*) plant leaf extract. *Ethiop. J. Educ. y Sc.* **5**(1): 21-36.
- Kramer, P. J. 1974 Relaciones hidricas del suelo y plantas : Una síntesis moderna. Crat, México 538 pp.
- Kuchenbuch, R. O. y Ingramm, K. T. 2004. Effects of soil bulk density on seminal and lateral roots of Young maize plants (*Zea mays* L.). *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **167**: 229-235.
- Lambers, H., Atkin, O. K. y Milleenaar, F. F. 2002. Respiratory patterns in roots in relation to their functioning. En: Waisel Y, Eshel A, Uzi Kafkafi U (Eds.) *Plant roots: the hidden half*, 3rd ed. Marcel Dekker, Inc., New York, p. 521-552
- Lemanceau, P., Bauer, P., Kraemer, S. y Jean-François, B. 2009. Iron dynamics in the rhizosphere as a case study for analyzing interactions between soils, plants and microbes. *Plant Soil* **321**: 513-535.
- Li, Hai-Gang, Shen, Jian-Bo, Zhang, Fu-Suo y Lambers, H. 2010. Localized application of soil organic matter shifts distribution of cluster roots of white lupin in the soil profile due to localized release of phosphorus. *Annals of Botany* **105**: 585-593.
- Llorca. L. R. y Bautista C. I. 2006. Prácticas de atmósfera, suelo y agua. editl. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España. p. 54-65.
- Luque A. R., Rico, R., León, Y. y Estrada, J. 2000. Prácticas de Laboratorio de Biología Vegetal. 28/12/10 <http://www.botanica.ciens.ula.ve>
- Lynch, J. P. y Brown, K. M. 2008. Root strategies for phosphorus acquisition. En: *The Ecophysiology of Plant-Phosphorus Interactions* P.J. White, J.P. Hammond (Eds.). Springer Science.
- Macinnis-Ng, C. M. O., Fuentes, S., O'Grady, A. P., Palmer, A. R., Taylor, D., Whitley, R. J., Yunusa, I., Zeppel, M. J. B. y Eamus, D. Root biomass distribution and soil properties of an open woodland on a duplex soil. *Plant Soil* **327**: 377-388.
- Marín, G. M. l., Aragón, R. P. y Gómez, B. C. 2002, Análisis químico de suelos y aguas: manual de laboratorio, edit. de la UPV, Valencia, España, p. 98-101

- Marques, F. A., Rosas, R. M., Bretas B. S.M., Lima N. J. de A. y Fernández L. J. F. W. 2007. Caracterização e classificação de Cambissolos do Arquipélago de Fernando de Noronha, Pernambuco. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* **31**: 1023-1034.
- Martínez, H. E., Fuentes, E. J. P. y Acevedo, H. E. 2008. Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal* **8** (1): 68-96.
- Martínez, J. A. y Fernández, F. D. 2006. Caracterización y distribución vertical de la fitomasa de raíces del bosque Semidecíduo en la Reserva de la Biosfera Península de Guanahacabibes, Cuba. *Revista Forestal Baracoa* **25** (1): 87-96.
- Maycock, C. R. y Congdon R. A. 2000. Fine root biomass and soil N and P in North Queensland Rain Forests. *Biotropica* **32** (1): 185-190.
- Mayer, R. 2005. Soil Resources and SEA. editl. Springer-Verlag. Germany p. 773
- McMichael, B. I. y Burke. 2002. Temperature effects on root growth. En: Waisel Y, Eshel A, Uzi Kafkafi U (Eds.). Plant roots: the hidden half, 3rd ed. Marcel Dekker, Inc., New York, p. 717-728
- Mejía, D. N., Maeve, J., y Ruíz, J. C. 2004. Análisis estructural de un bosque mesófilo de montaña en el extremo oriental de la sierra madre del sur (Oaxaca), México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*. **74**: 13-29.
- Mendoza, N. T. C. C., Paccola A. A., Sargebtella V. 2005. Influência do pH liberação de íons de ferro para a solução de solo de um latossolo vermelho escuro tratado com sacarose. *Energia na Agricultura, Botucatu* **20**(2): 30-40.
- Mengel, K. y Kirkby E. A. 2001. Principles of Plant Nutrition. 5a ed., editl Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 849 pp.
- Metcalfé, D. 2006. Cálculo de dinámicas de raíz en ecosistemas tropicales: manual de campo, PAN-AMAZONIA, p. 3
- Metcalfé, D. B., Meir P., Aragão, L. E. O. C., da Costa, A. C. L., Braga, Alan P., Gonçalves, Paulo H. L., Silva, J. J. de A., de Almeida, S. S., Dawson, L. A., Malhi, Y. y Williams, M. 2008. The effects of water availability on root growth and morphology in an Amazon rainforest. *Plant Soil* **311**: 189-199.
- Montecinos C. 1997. Manejo Biológico del Fósforo en el Suelo. Agroecología y desarrollo CLADES <http://www.clades.org/r8.art4.htm>
- Murphy, D. L. V., Stockdale, E. A., Brookes, P. C. y Goulding, K. W. T. Impact of microorganisms on chemical transformations in soil. En: Soil Biological Fertility - A Key to Sustainable Land Use in Agriculture. Abbott, L. K. y Murphy, D. V. (Eds.), p. 37-59
- Navarro, B. S. y Navarro G. G. 2003. Química Agrícola. El suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal. Segunda edición, ediciones Mundi-Prensa, España.
- Neher, D. A. 1999. Soil community composition and ecosystem processes. Comparing agricultural ecosystems with natural ecosystems. *Agroforestry Systems* **45**: 159-185.
- Nicotra, A. B., Babicka N. y Westoby M. 2002 Seedling root anatomy and morphology: an examination of ecological differentiation with rainfall using phylogenetically independent contrasts. *Oecologia* **130**: 136-145.

- Nodvin, S. C., Driscoll, C. T. y Likens G. E. 1988. Soil processes and sulfate loss at the Hubbard Brook Experimental Forest. *Biogeochemistry* **5**: 185-199.
- Nueman, G. y Römheld, V. 2002. Root-induced changes in the availability of nutrients en the rhizosphere. En: Waisel Y, Eshel A, Uzi Kafkafi U (Eds.) *Plant roots: the hidden half*, 3rd ed. Marcel Dekker, Inc., New York, p. 617- 649
- Oliveira, P. J. A., Afif, Z. E. y Mayor, L. M. 2006. Análisis de suelos y plantas y recomendaciones de abonado, edit. Universidad de Oviedo, Asturias, 49 pp.
- Ortiz, I., Fernández, E., Martín, F. y Dorronsoro, Carlos. 2008. Estimación de propiedades físicas del suelo en gabinete y su aplicación en la identificación de horizontes edáficos. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra* **16**(1): 57-63.
- Osler, G. H.R. 2007. Impact of fauna on chemical transformations in soil. En: *Soil Biological Fertility. A Key to Sustainable Land Use in Agriculture*. Abbott, L. K. y Murphy, D. V. (Eds.). 17-35 pp.
- Pagano, R. R. 2006. Estadística para las ciencias del comportamiento. International Thomson Editores, México, D.F., 580 pp.
- Park, B. B., Yanai, R. D., Fahey, J. T., Bailey, W. S., Siccama, G. T., Shanley, B. J. y Cleavitt, L. N. 2008. Fine Root Dynamics and Forest Production Across a Calcium Gradient in Ecosystems. *Ecosystems* **11**: 325-341.
- Pavón, N. P. y Briones, O. 2000. Root distribution, standing crop biomass and belowground productivity in a semidesert in México. *Plant. Ecology* **146**: 131-136.
- Paz, G., A., Taboada, C., M., T. y Gómez, S. J. (1997). Relación entre textura, pH, materia orgánica y complejo de cambio en el horizonte superior de un suelo sobre serpentinas. *Caderno Lab. Xeolóxico de Laxe* **22**: 5-14.
- Persson, H. y Stadenberg, I. 2007. Growth dynamics of fine roots in a coniferous fern forest site close to Forsmark in the central part of Sweden. SLU, Department of Ecology and Environmental Research.
- Persson, H. y Stadenberg, J. 2009. Spatial distribution of fine-roots in boreal forests in eastern Sweden. *Plant Soil* **318**: 1-14.
- Pizzani, P., Domínguez, C., De Marytino, G., Palma, J. y Matute, I. 2005. Evaluación nutricional del mantillo en un bosque seco tropical decíduo típico del nororiente del Estado Guárico, Venezuela. *Revista Científica* **15**(1): 20-26.
- Plasencia, A. y Corbella, R. D. 2011. Química del suelo. Cátedra de Edafología. Facultad de Agronomía y Zootecnia, Universidad Nacional de Tucumán.
- Prause, J., de Lifschitz, A. P. y Toledo, D. M. 2003. Dinámica de la mineralización de N, P, y K en hojas de *Schinopsis balansae* Engl. sobre un suelo forestal del Parque Chaqueño Húmedo. *Quebracho Revista de Ciencias Forestales* **10**: 46-52.
- Pritchett, W. L. 1990. Suelos forestales: propiedades conservación y mejoramiento. Editorial Limusa. México, D.F. 634 pp.
- Purbopuspito, J. y van Rees, K. C. J. 2002. Root distribution at various distances from clove trees growing in Indonesia. *Plant and Soil* **239**: 313-320.

- Ramesh, C. K., Manohar, K. D., Tripathi, K. K. y Singh, A. 2004. Diversity and functions of soil microflora in development of plants. *Plant Surface Microbiology*.
- Ramírez-Correa, J. A., Zapata-Duque, C. M., León-Peláez, J. D. y González-Hernández, M. I. 2007. Caída de hojarasca y retorno de Nutrientes en bosques montanos andinos de Piedras Blancas, Antioquia, Colombia. *Interciencia*, **32**(5): 303-310.
- Raven, H. P, Ray F. E. 1992. Biología de las plantas, Vol. 2, Editorial Reverte, Barcelona, España. 773 pp.
- Röderstein, Ma., Hertel, D. y Leuschner, C. 2005. Above- and below-ground litter production in three tropical montane forests in Southern Ecuador. *Journal of Tropical Ecology* **21**(5): 483-492.
- Rucks, L., García, F., Kaplán, A., Ponce de León, J. y Hill M. 2004. Propiedades físicas del suelo. Facultad de Agronomía. Dpto. Suelos y aguas. Universidad de la República. Montevideo-Uruguay, 68 pp.
- Ruiz, L. J. y Fandiño O. Ma. C. 2009. Estado del bosque seco tropical e importancia relativa de su flora leñosa, isla de la Vieja Providencia y Santa Catalina, Colombia, Caribe suroccidental. *Revista Académica Colombiana de Ciencias*. **33**(126): 5-15.
- Rzedowski, J. 1978. Vegetación de México, México, Ed. Limusa, 432 pp.
- Sale, F. A. y Agbideye, F. S. 2011. Litter biomass and soil organic matter content in a chronosequence of *Tectonia Grandis* [L.f.] stands in Shasha Forest Reserve, Nigeria. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences* **5**(8): 230-233.
- Santiago-Pérez, A. L., Jardel-Peláez, E. J., Cuevas-Guzmán, R. y Huerta-Martínez, F. M. 2009. Vegetación de bordes en un bosque mesófilo de montaña del Occidente de México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* **85**: 31-49.
- Schenk, J. H. 2005. Vertical Vegetation Structure Below Ground: Scaling from Root to Globe, *Progress in Botany* **66**: 343-373.
- Sierra, C. A., del Valle J. I. y Orrego, S. A. 2001. Ecuaciones de biomasa de raíces y sus tasas de acumulación en bosques sucesionales y maduros Tropicales de Colombia. Simposio internacional medición y monitoreo de la captura de Carbono en ecosistemas forestales. Valdivia Chile.
- Silveira, F. A. O. 2004. Anatomía Vegetal. Facultad de Ciencias de Cuervalo, Departamento de Ciencias Biológicas.
- Soethe, N., Lehmann, J. y Engels, C. 2006. Root morphology and anchorage of six native tree species from a tropical montane forest and an elfin forest in Ecuador. *Plant and Soil* **279**: 173-185.
- Sokolova, T. A. y Alekseeva, S. A. 2008. Adsorption of Sulfate Ions by Soils (A Review). *Eurasian Soil Science* **41**(2): 158-167.
- Soriano, M. 2004. Prácticas de diagnóstico de fertilidad del suelo, Editorial de la UPV, Valencia, España, p. 55, 73.



- Swamy, S. L., Mishra, A. y Puri, S. 2003. Biomass production and root distribution of *Gmelina arborea* under an agrisilviculture system in subhumid tropics of Central India. *New Forests* **26**: 167-186.
- Taiz, L. y Zeiger, E. 2006. Fisiología vegetal, publicaciones de la Universidad Jaume p. 510-511, 517-516
- Thompson, L. M. y Troeh F. R. (1982), Los suelos y su fertilidad. Vers. Española por Fabregas, T. J. P. Editorial Reverte, Barcelona, España. 649 pp.
- Toledo, T. 2009. El bosque de niebla. CONABIO. *Biodiversitas* **83**: 1-6
- Torres, C. S., Gómez, B. C., Aragón, R. P., G. y Marín, M. L. 2006. Técnicas instrumentales: manual de laboratorio, edit. UPV, Valencia, España p. 85-86.
- Ukonmaanaho, L., Merila, P., Nöjd, P. y Nieminen, T. M. 2008. Litter production nutrient return to the forest floor in Scots pine and Norway spruce in Finland. *Boreal Environment Research* **13**: 67-91.
- Uselman, S. M., Qualls, R. G. y Lilienfein, J. 2007. Fine root production across a Primary Successional Ecosystem Chronosequence at Mt. Shasta, California. *Ecosystems* **10**: 703-717.
- Valdés, V. E. 2010. Evaluación del carbono y nutrientes edáficos por clase de geoforma y tipo de manglar en marismas nacionales, Nayarit. Colegio de postgraduados.
- Valdez, T. V., Foroughbakhch P. R., Alanís F. G. 2003. Distribución Relictual Del Bosque Mesófilo De Montaña En El Noreste De México. *Ciencia* **360**(3): 360-365.
- Vargas, D. N., Bertiller, M. B., Ares, J. O., Carrera, A. L. y Sain C. L. 2006. Soil C and N dynamics induced by leaf-litter decomposition of shrubs and perennial grasses of the Patagonian Monte. *Soil Biology y Biochemistry* **38**: 2401-2410.
- Velásquez, E., Lavelle P., Rendeiro C., Martins M., Barot S., Grimaldi M. 2008 Cambios en las comunidades de plantas influenciados por la macroagregación del suelo a través de la actividad de la macrofauna del suelo en la Amazonía Brasileira.
- Vilche, M. S., Martín, B. y Montico, S. 2001. Incidencia de la degradación edáfica en el desarrollo aéreo radical de una pastura consociada. *Archivos Latinoamericanos de Producción Animal* **9**(1): 30-34.
- Villaseñor, J. L. 2010. El bosque húmedo de montaña en México y sus plantas vasculares: catálogo florístico-taxonómico. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad - Universidad Nacional Autónoma de México. México D. F. 40 pp.
- Walker, T. S., Pal, B. Harsh., Grotewold, E. y Vivanco, J. M. 2003. Root Exudation and Rhizosphere Biology. *Plant Physiology* **132**: 44-51.
- Wang, F. E., Chen, Y. X., Tian, G. M., Kumar, He, Y. F., Fu, Q.L. y Lin, Q. 2004. Microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus in the soil profiles of different vegetation covers established for soil rehabilitation in a red soil region of southeastern China. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **68**: 181-189.

- Warren, M. W. y Zou, X. 2002. Soil macrofauna and litter nutrients in three tropical tree plantations on a disturbed site in Puerto Rico. *Forest Ecology and Management* **170**: 161-171.
- Watwood, M. E., Fitzgerald, J. W., Swank, W. T. y Blood, E. R. (1988). Factors involved in potential sulfur accumulation in litter and soil from a coastal pine forest. *Biogeochemistry* **6**: 3-19.
- Wild, A. 1992. Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas según Russell. Ed. Mundi-Prensa. Madrid, España. 1045 pp.
- Williams-Linera, G., H, M. R., y Isunza, V. E. 2002. La fragmentación del bosque mesófilo de montaña y patrones de uso del suelo en la región oeste de Xalapa, Veracruz, México. *Madera y Bosques*, **8**(1): 73-89.
- Wood, T. E., Lawrence, D. y Clark, D. A. 2006. Determinants of leaf litter nutrient cycling in a Tropical Rain Forest: soil fertility versus topography. *Ecosystems* **9**: 1-11.
- Wu, K. H., Jentschke, G. y Godbold, D. L. 2001. Contribution of root turnover to nutrient cycling in beech forests. *Plant nutrition* **92**(11): 916-917.
- Xu, X., Hideaki, S. y Shi, F. 2010. Iron dynamics in forest ecosystems: effects of topography and vegetation type. Closing Symposium on the Amur-Okhotsk Project.
- Yermakov, Z. y Rothstein, D. E. 2006. Changes in soil carbon and nitrogen cycling along a 72-year wildfire chronosequence in Michigan jack pine forests. *Oecologia* **149**: 690-700.
- Zhou, Z. y Shangguan Z. 2007. Vertical distribution of fine roots in relation to soil factors in *Pinus tabulaeformis* Carr. forest of the Loess Plateau of China. *Plant Soil* **291**: 119-129.
- Zushi, K. 2006. Spatial distribution of soil carbon and nitrogen storage and forest productivity in a watershed planted to Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don). *Journal of Forest Research*. **11**(5): 351-358.