



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO**

**DIVISIÓN DE CIENCIAS FORESTALES**

**INFLUENCIA DE LA PROFUNDIDAD, PENDIENTE Y  
COBERTURA SOBRE CARBONO Y NITRÓGENO DEL SUELO EN  
ZOQUIAPAN**

**TESIS**

**Que como requisito parcial para obtener el grado de:  
MAESTRA EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES**

**Presenta:**

**SUSANA MADRIGAL REYES**



**Bajo la dirección de:**

**DR. DAVID CRISTÓBAL ACEVEDO**

DIRECCION GENERAL ACADEMICA  
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES  
FICINA DE EXAMENES PROFESIONALES

**Chapingo, Estado de México, Mayo 2017**



INFLUENCIA DE LA PROFUNDIDAD, PENDIENTE Y COBERTURA SOBRE  
CARBONO Y NITRÓGENO DEL SUELO EN ZOQUIAPAN

Tesis realizada por **SUSANA MADRIGAL REYES** bajo la supervisión del Comité  
Asesor indicado, aprobado por el mismo y aceptado como requisito para obtener  
el grado de:

**MAESTRA EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES**

DIRECTOR:



DR. DAVID CRISTÓBAL ACEVEDO

ASESORA:



DRA. ELIZABETH HERNÁNDEZ ACOSTA

ASESOR:



DR. JOSÉ LUIS ROMO LOZANO

## CONTENIDO

LISTA DE CUADROS .....	v
LISTA DE FIGURA .....	vi
ABREVIATURAS, SIMBOLOS Y ACRONIMOS USADOS .....	vi
DEDICATORIAS .....	ix
AGRADECIMIENTO .....	x
DATOS BIOGRÁFICOS.....	xi
CAPÍTULO 1 .....	1
1 INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
1.1 Justificación y Planteamiento del problema.....	3
1.2 Objetivos.....	5
1.2.1 Objetivo General .....	5
1.2.2 Objetivos Particulares.....	5
1.3 Hipótesis.....	6
CAPÍTULO 2.....	8
2 REVISIÓN DE LITERATURA.....	8
2.1 Literatura Citada .....	20
CAPÍTULO 3.....	26
INFLUENCIA DE LA PROFUNDIDAD, PENDIENTE Y COBERTURA SOBRE CARBONO Y NITRÓGENO DEL SUELO EN ZOQUIAPAN .....	26
3.1 RESUMEN.....	26
3.2 ABSTRACT .....	27

3.3 INTRODUCCIÓN .....	28
3.4 MATERIALES Y MÉTODOS .....	30
3.4.1 Área de estudio .....	30
3.4.2 Selección de los sitios de muestreo .....	32
3.4.3 Muestreo de suelo .....	36
3.4.4 Determinaciones Físicas y Químicas .....	37
3.4.5 Análisis de datos .....	39
3.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	40
3.5.1 Concentración y Contenido de Carbono orgánico en el suelo.....	42
3.5.2 Concentración y Contenido de Nitrógeno en el suelo .....	45
3.5.3 Relación Carbono/Nitrógeno .....	49
3.5.4. Nitrógeno inorgánico .....	50
3.5.5 Comparación de valores de las variables utilizando el promedio de muestras simples y muestras compuestas.....	54
3.6 CONCLUSIONES .....	55
3.7 AGRADECIMIENTOS.....	56
3.8. LITERATURA CITADA .....	56
ANEXO .....	61

## LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Unidades de muestreo identificadas. ....	35
Cuadro 2. Georeferenciación de sitios de muestreo en el área de estudio.....	36
Cuadro 3. Factores y niveles de las variables de estudio. ....	39
Cuadro 4. Análisis de Varianza de la influencia de la pendiente del terreno, cobertura y profundidad del suelo en la concentración y contenido de carbono y nitrógeno en el suelo en Zoquiapan.....	41
Cuadro 5. Mejores tratamientos para la concentración y contenido de carbono en el suelo del área de estudio. ....	43
Cuadro 6. Mejores tratamientos para la concentración y contenido de nitrógeno total en el suelo de la Estación Forestal Experimental Zoquiapan.....	47
Cuadro 7. Mejores tratamientos para la relación carbono/nitrógeno en el suelo del área de estudio. ....	49
Cuadro 8. Mejores tratamientos para la concentración y contenido de amonio en el suelo del área de estudio. ....	51
Cuadro 9. Mejores tratamientos para la concentración y contenido de nitrato en el suelo del área de estudio. ....	53
Cuadro 10. Concentración y contenido de carbono, nitrógeno total, amonio, nitratos y relación carbono-nitrógeno en las muestras compuestas de suelo...	54

## LISTA DE FIGURA

Figura 1. Ciclo del nitrógeno. Fuente: Elaboración propia. ....	14
Figura 2. Ciclo del Carbono. Fuente: Elaboración propia. ....	16
Figura 3. Localización de la Estación Experimental Forestal Zoquiapan, UACH. Fuente: Elaboración propia. ....	31
Figura 4. Coberturas de la Estación Forestal Experimental Zoquiapan. Fuente: Elaboración propia. ....	33
Figura 5. Clasificación de pendiente del terreno en el área de estudio. Fuente: Elaboración propia. ....	34
Figura 6. Selección de sitios de muestreo. Fuente: Elaboración propia. ....	36

## ABREVIATURAS, SIMBOLOS Y ACRONIMOS USADOS

### Abreviaturas

ConcCO	Concentración carbono orgánico
ContCO	Contenido de carbono orgánico
ConcNtot	Concentración nitrógeno total
ContNtot	Contenido nitrógeno total
ConcNit	Concentración de nitrato
ContNit	Contenido de nitrato
ConcAm	Concentración de amonio
ContAm	Contenido de amonio
Cob	Cobertura vegetal
Pend	Pendiente del terreno
Prof	Profundidad de muestreo
Conc	Concentración
Cont	Contenido
PA	Pino-aile
P	Pino
O	Oyamel

P1	Profundidad 0-10 cm
P2	Profundidad 10-20 cm
P3	Profundidad 20-30 cm
1	Pendiente de 0-10.10 grados
2	Pendiente de 10.10-21.16 grados
3	Pendiente de 21.16-48.43 grados
cm	centímetro
m	metro
mm	milímetro
m <sup>2</sup>	metros cuadrados
Ps	Profundidad del suelo
Pg	Pentagramos
h	gramo
ha	hectárea

### Símbolos

%	por ciento
pH	Potencial de hidrogeno
COS	Carbono orgánico del suelo
N	Nitrógeno
Dap	Densidad aparente
Rel C/N	Relación carbono/nitrógeno
MO	Materia orgánica
g cm <sup>3</sup>	gramos /centímetro cubico
Mg ha <sup>-1</sup>	Megagramos por hectárea
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Amonio
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Nitrato
P	Fosforo
K <sup>+</sup>	Potasio
Ca <sup>2+</sup>	Calcio
Mg <sup>2+</sup>	Magnesio
°C	Grados Celsius
N <sub>2</sub>	Nitrógeno molecular
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono

N <sub>2</sub> O	Óxido nitroso
NH <sub>3</sub>	Amoniaco

### **Acrónimos**

EFEZ	Estación Forestal Experimental Zoquiapan
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
GPS	Global Positioning System (Sistema de Posicionamiento Global)
SAS	Statistical Analysis System
IPCC	Panel Intergubernamental del Cambio Climático

## **DEDICATORIAS**

Dedico de manera especial a mis padres por ser el cimiento para la construcción de mi vida profesional, sentaron en mí las bases de responsabilidad y deseos de superación.

En memoria de Francisco Reyes Coterot, desde donde se encuentre sé que estará feliz por este logro alcanzado.

A María Jesús por su apoyo incondicional brindado día a día.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a la Universidad Autónoma Chapingo, especialmente al posgrado de la División de Ciencias Forestales, por haberme dado la oportunidad de realizar mis estudios de Maestría.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología** (CONACYT) por su apoyo económico para la realización de esta tesis.

A mí director de Tesis, Dr. David Cristóbal Acevedo por su dedicación, conocimiento, sus orientaciones pertinentes para llevar a cabo la investigación.

A la Dra. Elizabeth Hernández Acosta por la confianza brindada y por compartir conmigo sus conocimientos.

Al Dr. José Luis Romo Lozano por su tiempo y dedicación para la colaboración en la realización de este trabajo.

Al Dr. Mateo Vargas por su dedicación, empatía y aportaciones certeras en la realización de este trabajo.

## **DATOS BIOGRÁFICOS**



### **Datos personales**

Nombre: Susana Madrigal Reyes

Fecha de nacimiento: 14 de septiembre 1985

Lugar de nacimiento: Casimiro Castillo, Jalisco.

CURP: MARS850914MJCDYS06.

Profesión: Ingeniero Agrónomo Especialista en Zonas Tropicales

Cedula profesional: 7077374.

### **Desarrollo académico**

Bachillerato: Escuela Preparatoria Regional de Casimiro Castillo, Universidad de Guadalajara, Jalisco.

Licenciatura: Ingeniero Agrónomo Especialista en Zonas Tropicales, Dirección de Centros Regionales, Universidad Autónoma Chapingo.

# CAPÍTULO 1

## 1 INTRODUCCIÓN GENERAL

El suelo es la base de los recursos en los ecosistemas, su estudio y conservación es de vital importancia, y se define como aquel material no consolidado en la superficie de la tierra que ha estado sometido a la influencia de factores genéticos y ambientales (material parental, clima, microorganismos y topografía), actuando durante un determinado periodo. Es un cuerpo natural que está involucrado en interacciones dinámicas con la atmósfera y con los estratos que están debajo de él.

Los factores de formación del suelo son: la roca madre, el relieve, el tiempo, el clima y los seres vivos; la geoforma (relieve) del terreno es un componente importante ya que de acuerdo a la inclinación y longitud de las laderas, la posición fisiográfica y su orientación, es el grado de erosión presente, a su vez influye en la cantidad de agua que accede y pasa a través del suelo, en relieves convexos el agua circula por la superficie hacia las zonas más bajas y se crea un área de aridez local, mientras que, lo contrario ocurre para las formas de relieve cóncavo. (Sancho y Villatoro, 2005; Hincapié y Conrado, 2012).

Las zonas de mayor pendiente son más sensibles a la destrucción y pérdida del suelo, lo que disminuye la fertilidad y productividad de los ecosistemas, otra variable que incide en esta capacidad es la cobertura vegetal. La dinámica de los nutrientes de los ecosistemas se atribuye particularmente a las características del suelo y su proceso de formación, su reciclado es un factor fundamental para la incorporación diaria de elementos y materia orgánica (Gallardo, 2002). Prause *et al.*, (2003) mencionan que, en un ecosistema forestal en equilibrio hay una relación entre la cantidad de material vegetal aportado anualmente al suelo y la tasa de descomposición en ese tiempo, además, en estos ecosistemas la fracción aportada más importante por su abundancia, le corresponde a las hojas que tienen composiciones químicas particulares para cada especie.

Los nutrientes se mueven de un compartimento a otro, sufren continuas transformaciones orgánicas e inorgánicas en los ecosistemas, este flujo es lento, ya que muchos nutrientes son secuestrados en distintos compartimentos y son reciclados internamente. Valladares (2004) menciona que el ciclo de nutrientes en un ecosistema forestal consta de la entrada de nutrientes (meteorización de la roca madre, fijación biológica del nitrógeno, aportes atmosféricos y transferencias por biota), del flujo de nutrientes entre las plantas y el suelo (absorción radicular y foliar, retranslocación, pluviolavado, pérdidas por herbívoros y descomposición), y de las salidas de los elementos del ecosistema (lixiviación, escorrentía, emisión de gases y aerosoles, transferencias por biota y explotación de los recursos). Estos procesos varían de un ecosistema a otro, y dentro del mismo así como también hay una variación espacial y temporal que conocemos como dinámica de nutriente (Roda, 1993).

Las actividades forestales afectan los flujos de nutrientes, por lo cual, es necesario realizar un manejo adecuado de los suelos que permitan conservar su fertilidad y productividad (Sánchez *et al.*, 2003; Granados *et al.*, 2007). Actualmente se han generado iniciativas para fomentar la elaboración de planes de manejo de ordenación forestal, destinados a aumentar al máximo la aportación de los bosques.

Debido a su ubicación geográfica y a su diverso relieve, México tiene una gran complejidad de ecosistemas, como bosques de coníferas, bosque mesófilo de montaña, bosque de encino, bosque tropical perennifolio, bosque tropical caducifolio, bosque tropical subcaducifolio, bosque espinoso, matorral xerófilo, pastizal, vegetación acuática y subacuática, bosque secundario y pastizales inducidos y cultivos (INEGI, 2008; CONABIO, 2012a). Los bosques templados en México, abarcan una superficie de 693,285.8 km<sup>2</sup> (INEGI, 2011) y se distribuyen a lo largo de las principales cordilleras de México; están compuestos de diversas formaciones vegetales (coníferas y latifoliadas) y son consideradas como áreas potenciales para el almacenamiento de carbono en el suelo, Zambrano *et al.*, (2004) mencionan que el suelo contiene un 36% del total del carbono a un metro

de profundidad (1.500 Pg), los ecosistemas forestales contienen más carbono por unidad de superficie que cualquier otro uso de la tierra.

Por lo anterior, este estudio tiene el propósito de conocer el efecto de la profundidad, pendiente y cobertura vegetal en la concentración y contenido de carbono y nitrógeno en el suelo de la Estación Experimental Forestal Zoquiapan.

### **1.1 Justificación y Planteamiento del problema**

Los bosques juegan un papel fundamental en el ciclo de carbono y nitrógeno, siendo los suelos forestales importantes sumideros de estos elementos, contribuyendo en la productividad de los sistemas y en los cambios de concentración de CO<sub>2</sub> atmosférico (Macías, 2002; Orellana *et al.*, 2012).

Chapela (2012) menciona que las áreas forestales son un recurso importante para mitigar el proceso de cambio climático, pues mediante la reducción de la deforestación y degradación forestal se mejoran los balances de emisiones de CO<sub>2</sub>, la cual es una de las causas principales del fenómeno de calentamiento global.

El suelo tiene un efecto amortiguador sobre los gases de efecto invernadero (GEI), sin embargo, es sujeto a sufrir un desequilibrio en sus propiedades y características, resultado de las diversas actividades productivas antropogénicas. Considerado como uno de los grandes reservorios de carbono, y almacenador de nitrógeno; pues captura dos de los seis GEI el CO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>O los cuales se encuentran suspendidos en la atmosfera ocasionando en gran medida el calentamiento del planeta.

El carbono (C) y el nitrógeno (N) que se localizan en el suelo se encuentran en la materia orgánica (MO) junto con los productos orgánicos producidos en su transformación. El contenido de nutrientes de la MO es importante para las plantas, por medio de la actividad de la flora y la fauna presentes en el sub-suelo, esos nutrientes son transformados en sustancias inorgánicas y son disponibles para las plantas. La MO favorece la estructura estable de agregados en el suelo

debido a su asociación con las arcillas, donde se incrementa la capacidad de retención de agua absorbiendo así de tres a cinco veces más su propio peso.

La evaluación de la fertilidad del suelo indica la mayor o menor existencia de los elementos minerales que necesita el vegetal para su nutrición, su disponibilidad se expresa por su concentración y contenido, otros aspectos a considerar para su evaluación es el uso del suelo, sus características y su proceso de formación. Una mejor expresión de la fertilidad además de la concentración y contenido de un elemento es la valoración de su dinámica y velocidad de reciclaje, aunque esta es mucho más compleja que la estimación puntual de la reserva de los nutrientes (García *et al.*, 2012).

Asociado a esto, las variables, pendiente del terreno y vegetación inciden de forma muy diversa; pendientes fuertes producen una situación con menor disponibilidad hídrica, más riesgo de escorrentía y por tanto de erosión, la forma de la ladera también influye en declives cóncavas habrá mayor profundidad de suelo y más humedad al predominar el depósito sobre la erosión, caso contrario ocurre en las pendientes convexas en las que hay una mayor escorrentía, incrementa la erosión, suelos más pedregosos y menor capacidad de retención de agua, por lo que le corresponderá una vegetación más xerófila o de menor espesura. Las pendientes convexas se manifiestan más frecuentemente en el tramo superior de la ladera (Harold y Hocker, 1984; FAO, 2015).

Por lo señalado anteriormente se planteó como problema de investigación lo siguiente: ¿Qué influencia tiene la profundidad, pendiente y cobertura en la concentración y contenido del carbono y nitrógeno en el suelo en la Estación Forestal Experimental Zoquiapan?

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo General**

Analizar el efecto de la profundidad, pendiente y cobertura vegetal en la concentración y contenido del carbono y nitrógeno, para diferenciar sus reservorios en el suelo de los Bosques de Zoquiapan, México.

### **1.2.2 Objetivos Particulares**

1. Determinar la concentración y contenido de carbono, nitrógeno total, amonio, nitrato y relación carbono/nitrógeno, bajo diferentes profundidades, pendiente del terreno y coberturas vegetales, a través del análisis de muestras de suelo en laboratorio.
2. Conocer cuál es el efecto de diferentes profundidades, pendiente y coberturas, sobre la concentración y contenido de carbono, nitrógeno total, amonio, nitrato y relación carbono/nitrógeno del suelo por medio del uso de herramientas estadísticas para identificar en que sistemas de bosque se tiene mejor almacenamiento de estos elementos.
3. Conocer si existen diferencias en la concentración y contenido de carbono, nitrógeno total, amonio, nitrato y relación carbono/nitrógeno, utilizando muestras simples caracterizadas a 0-10, 10-20 y 20-30 cm y muestras compuestas de 0-30 cm de profundidad del suelo, a través de su análisis e interpretación gráfica.

### 1.3 Hipótesis

1. La concentración y contenido de carbono, nitrógeno total, amonio, nitrato y relación carbono/nitrógeno en el suelo se ven influenciados por las coberturas vegetales de Bosque de Pino, Oyamel y la Asociación de Pino-Aile en la Estación Forestal Experimental Zoquiapan.
2. El grado de pendiente del terreno determina la concentración y contenido de carbono, nitrógeno total, amonio, nitrato y relación carbono/nitrógeno en el suelo; a mayor pendiente menor almacenamiento de estos nutrientes.
3. Las diferencias en la concentración y contenido de carbono, nitrógeno total, amonio, nitrato y relación carbono/nitrógeno utilizando muestras simples caracterizadas a 0-10, 10-20 y 20-30 cm de profundidad del suelo y muestras compuestas de 0-30 cm de profundidad, es mayor al 10 por ciento.

El presente trabajo de investigación se integra de tres capítulos: 1) Introducción general, 2) Revisión de literatura e 3) Influencia de la profundidad, pendiente y cobertura sobre carbono y nitrógeno del suelo en Zoquiapan, México.

En el capítulo 1 se enmarca una introducción general de la temática de estudio, la importancia de la problemática referente al tema, sus antecedentes, justificación del trabajo en torno al flujo y almacenamiento del carbono y nitrógeno en el suelo forestal, así como los objetivos general y particulares e hipótesis trazadas para llevar a cabo esta investigación.

El capítulo 2, se integra por un análisis del estado del conocimiento respecto al problema de estudio de la tesis.

El capítulo 3, comprende el desarrollo del tema de investigación se describen los procesos y métodos empleados para calcular y reportar los contenidos de carbono, nitrógeno total, amonio, nitrato y relación carbono/nitrógeno en el suelo bajo el efecto de diferentes profundidades, pendiente del terreno y coberturas vegetales presentes en el área de estudio, el análisis de la información fue a través de análisis de varianza y comparación de medias de tratamientos para identificar la mejor cobertura para almacenamiento de carbono y nitrógeno.

## CAPÍTULO 2

### 2 REVISIÓN DE LITERATURA

En este apartado se presenta en forma breve el marco teórico de conceptos y metodologías útiles para el conocimiento del flujo de los nutrientes presentes en el suelo, así como para la determinación de algunas de sus propiedades físico-químicas que permitirán relacionar los efectos de profundidad, pendiente del terreno y vegetación en la caracterización de los reservorios de los elementos: carbono y nitrógeno.

El suelo es aquel que se ha formado a expensas de rocas y depósitos de materiales transportados expuestos a factores del medio, tales como clima, roca madre, relieve y vegetación en un tiempo determinado; mismos que lo caracterizan de propiedades físicas, químicas y biológicas, haciéndolo un medio natural, complejo y dinámico, dando soporte a la vida vegetal. Los factores de formación fueron definidos por Jenny H. (1941). Dos de estos son de interés, la geoforma del terreno y vegetación.

Entendiéndose como geoforma a toda aquella figura sólida terrestre originada y moldeada sobre la corteza terrestre, tridimensional que tiene forma, tamaño, volumen y topografía, elementos que generan un relieve; compuesta por materiales que le son característicos como grava, arena, limo, arcilla o cuerpos de roca, tiene una génesis y por lo tanto una dinámica que explica que los materiales que la forman, son generadas por procesos morfogenéticos de carácter endógeno y exógeno; encierra entonces toda la variedad de relieve existente en la tierra: montañas, valles, planicies, llanuras, entre otras. (Leyva, 2001b; FAO, 2009). Cabe mencionar que algunas geoformas ubicadas a altitudes mayores sobre el nivel del mar determinan el comportamiento climático local y condicionan la distribución de las especies; la Estación Forestal Experimental Zoquiapan presenta una diferenciación espacial en función de los procesos morfológicos del terreno, la mayoría pertenece a áreas con pendientes accidentadas.

La vegetación forestal es aquel conjunto de plantas y hongos que crecen y se desarrollan en forma natural, formando bosques, selvas, zonas áridas y semiáridas, y otros ecosistemas, dando lugar al desarrollo y convivencia equilibrada de otros recursos y procesos naturales (LGDFS, 2015). Los tipos de vegetación se han definido principalmente por su fisionomía, derivada a su vez de la forma de vida (biotipo) de sus especies dominantes. Formas de vida y en consecuencia fisionomía son en cierto modo expresión de los factores del medio, ya sean climáticos, edáficos o bióticos, en que un determinado tipo de vegetación o los elementos que lo forman se desenvuelven (Miranda y Hernández, 1963; CONAFOR, 2015).

Existe una gran riqueza de especies forestales, las cuales contribuyen a la producción de oxígeno y captura de carbono, es relevante conocer la composición de la cobertura arbórea, arbustiva y herbácea para lograr obtener la concentración de carbono en la vegetación; se estima que en general es del 50 % (IPCC, 1996; Brown, 1997). Montero *et al.*, (2013) valoraron la concentración media de carbono para formaciones de matorrales y sotobosque en España, la cual osciló entre el 46.72 y 53.38%, estos resultados se sitúan en el mismo rango que los obtenidos en estudios realizados en Australia, USA, México y otros países iberoamericanos, donde se ha discutido la variabilidad del % de concentración de carbono sugerido por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el cambio climático. Por su parte Yerena *et al.* (2012), reportaron el porcentaje de contenido total de carbono por componente de las especies arbóreas y arbustivas de la Reserva Ecológica del Matorral en Nuevo León, México, donde para la corteza se obtuvo un 42.08, ramillas 45.70, ramas 45.73, tallo 45.93 y hojas con 48.14 % de carbono.

Determinar el balance del carbono, en la cobertura vegetal como en el suelo es de importancia tanto ecológica como económica, ya que las áreas de conservación se pueden insertar en las estrategias de mercadeo de bonos de carbono y mitigación al cambio climático.

Entiéndase como captura, situación inversa a las emisiones de gases de efecto invernadero, este mecanismo permite a países ricos en biodiversidad forestal, realicen la captura de carbono que los países más contaminantes emiten, de esta forma se establece un convenio comercial de pago por servicios ambientales, donde las naciones que contaminan, pagan a las que menos contaminan (Acosta *et al.*, 2011).

Siendo la cobertura vegetal al igual que el suelo, sumideros de carbono y aportadores de nutrientes para el crecimiento de las plantas, es necesario conocer más a detalle aquellos factores que impactan en el proceso formativo del suelo, debido a la particularidad de la investigación, cuyo propósito es contar con datos verídicos de cantidades próximas del reservorio de carbono en el subsuelo; a lo largo de los años se han llevado a cabo investigaciones que han realizado análisis de la complejidad de los ecosistemas, cuyo propósito ha sido conocer la productividad de un sistema natural. El grado de productividad de los sistemas naturales, está relacionado principalmente con la materia orgánica y su grado de descomposición, esta dinámica involucra al carbono y nitrógeno por su contenido en los materiales depositados; la materia orgánica presenta una variabilidad espacial de un ecosistema a otro y dentro de cada uno, tanto horizontal como vertical, su composición varía según el tipo de planta, edad y función de cada estructura vegetal (Challenger y Soberón, 2008).

Las temperaturas moderadas y bajas de los bosques, retardan la biodegradación de la materia orgánica, dando lugar a contenidos importantes en el suelo. Referente a su productividad, la MO aumenta la fertilidad al regular sus propiedades físicas, químicas y biológicas, al mejorar su estructura favoreciendo la formación de agregados e incrementando la capacidad de retención de agua, en cuanto a las propiedades químicas se tiene un efecto importante pues se suministran elementos nutritivos para que estén disponibles para las plantas, por medio de la mineralización, ayudándole además a la estabilización de la acidez por su poder amortiguador, respecto a las propiedades biológicas, la MO estabiliza la actividad de la flora y fauna, proporcionándoles energía y nutrientes,

por otra parte, hace que el suelo sea menos susceptible a la erosión por la mayor agregación y acción protectora de los residuos vegetales (Leyva, 2001a).

Otra propiedad del suelo que influye en la productividad de los ecosistemas es la densidad aparente (Dap), presenta una estrecha relación con otras propiedades, tal como la materia orgánica. La condición física del suelo es fundamental para definir su calidad/salud y es afectada por el uso, a través de indicadores fáciles y sencillos de determinar se puede conocer. La densidad aparente se define como la masa de suelo seco en una determinada unidad de volumen edáfico y su valor se relaciona con la proporción de poros existentes en dicho volumen, las alteraciones de Dap a través del tiempo pueden ser debidas al tránsito, laboreo, crecimiento de raíces y/o al movimiento de la fauna en su interior. Aumentos en Dap se asocian a ambientes edáficos más pobres que limitan el crecimiento de raíces, debido a la reducción de los poros y aumento de la compactación. El valor de la densidad aparente debe ser conocido para poder transformar las concentraciones de nutrientes y minerales a contenido y conocer con ello el reservorio de dichos elementos en el suelo (Salamanca y Sadeghian, 2005). Existen diferentes técnicas metodológicas que permiten la determinación de la densidad aparente estas son descritos por Gabriels y Lobo (2006) dichas variantes están relacionados con el tamaño de la muestra, la manera de coleccionar la misma y medir su volumen.

Los ciclos de los nutrientes o ciclos biogeoquímicos incluyen varios sistemas a diferentes escalas, están compuestos por entradas, salidas y transformaciones y/o componentes del ciclo, los elementos químicos, el carbono, oxígeno, nitrógeno, hidrógeno, potasio, calcio, fósforo, azufre y otros, se transportan entre los organismos y entre los componentes no vivos (CONABIO,2012b), estos son parte esencial de la estructura y la función de los organismos, algunos se acumulan en ellos mientras están vivos y regresan al suelo y a la atmósfera cuando mueren, cambios drásticos en la dinámica de sus ciclos producen contaminación, eutroficación (aumento de nutrientes en humedales) y hasta el cambio climático global, es por ello la importancia de conocer su ciclo.

De acuerdo a la magnitud y temática del estudio, es necesario conocer de manera general el ciclo del nitrógeno y carbono.

### El ciclo del nitrógeno

El nitrógeno es uno de los elementos ampliamente distribuido en la naturaleza, esencial para los seres vivos, la fuente principal del N es la atmósfera (79%), existen otras reservas como las rocas ígneas, agua de lluvia, sedimentos fósiles, materia orgánica. Perdonomo y Barbazán (1999) señalaron que del total del N que hay en el suelo aproximadamente el 98% se encuentra formando compuestos orgánicos, dependiendo del contenido de MO, los primeros 20 cm de profundidad pueden contener entre 1,000 y 10,000 kg ha<sup>-1</sup> de N al año. El nitrógeno presente en el suelo no está disponible como tal para las plantas, para ser absorbido tiene que pasar a formas inorgánicas a través del proceso de mineralización; el nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) y nitrito (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>), representan un 2 % del N total, son formas transitorias en el suelo, sus cantidades son variables. Existe un subciclo del N, en este se incluyen los microorganismos, raíces y materia orgánica, representado por la mineralización y la inmovilización, que es la transformación de N inorgánico en N orgánico; la base de estas transformaciones radica en las reacciones de oxidación y reducción, las cuales tiene lugar en las células de los microorganismos y en los tejidos de las plantas (Plasencia y Corbella, 2002).

La mineralización consiste en todos los procesos por los cuales el N orgánico es transformado a N inorgánico por los microorganismos del suelo como son bacterias, hongos y actinomicetos en condiciones aeróbicas y anaeróbicas. Involucra dos etapas: amonificación y nitrificación, la primera ocurre con la descomposición de compuestos nitrogenados de los tejidos de los organismos, obteniendo como producto final NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, es una reacción de tipo alcalina afectada por temperatura, humedad, pH y aireación; la nitrificación es la conversión de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> a NO<sub>3</sub><sup>-</sup> mediante reacciones de oxidación (nitritación y nitratación) de bacterias, por lo general este es un proceso dependiente de la temperatura, del contenido de agua, el pH y el potencial osmótico del suelo. La temperatura óptima

para la nitrificación varía dependiendo de la ubicación geográfica y la profundidad del suelo (Cabrera, 2007). La inmovilización es el proceso inverso a la mineralización, es la conversión de N inorgánico a las formas orgánicas debido a reacciones asociadas principalmente con el crecimiento y metabolismo microbiano que utilizan el N inorgánico y lo convierten en formas constitutivas de sus tejidos quedando el N inmovilizado. Las ganancias de nitrógeno en el suelo se dan particularmente por la fijación de N atmosférico por microorganismos, aporte de N inorgánico y sales arrastradas por las lluvias, fertilización y biomasa muerta, y las pérdidas de N ocurren por la desnitrificación, volatilización, lixiviación, extracción por cosechas y erosión (Murrell, 2003; Cerón y Gutiérrez,2012).



## El ciclo del carbono

El Carbono es el cuarto elemento más abundante en el planeta, existen básicamente dos formas de carbono: orgánica e inorgánica. El carbono orgánico del suelo representa la mayor reserva en interacción con la atmósfera; White y Minang (2011) mencionan que el dióxido de carbono es intercambiado entre la vegetación, suelo y atmósfera, esto produce cambios en los balances netos entre el secuestro y la liberación a lo largo de periodos de tiempo.

El ciclo de carbono comienza con la fijación del dióxido de carbono atmosférico a través del proceso de fotosíntesis realizada por las plantas y ciertos microorganismos (Figura 2), el  $\text{CO}_2$  y el agua reaccionan para formar carbohidratos y simultáneamente se libera oxígeno que pasa a la atmósfera, parte de los carbohidratos son consumidos por la planta para suministrar energía, el anhídrido carbónico formado se libera a través de las hojas o de las raíces; otra parte es consumida por los animales, que también liberan  $\text{CO}_2$  en sus procesos metabólicos (Orellana *et al.*, 2012).

Los desechos de plantas y animales son descompuestos por microorganismos del suelo, formándose la materia orgánica. El carbono es el principal componente de la MO, su ciclo resulta del balance entre la incorporación del material orgánico y la salida de carbono en forma de  $\text{CO}_2$  a la atmósfera, erosión y lixiviación (lavado y pérdida del nutriente causado por el desplazamiento del agua). Cuando los suelos tienen condiciones aeróbicas, una parte importante del carbono que ingresa, es lábil y se mineraliza rápidamente y una pequeña fracción se acumula como humus estable (FAO, 2002; Martínez *et al.*, 2008).

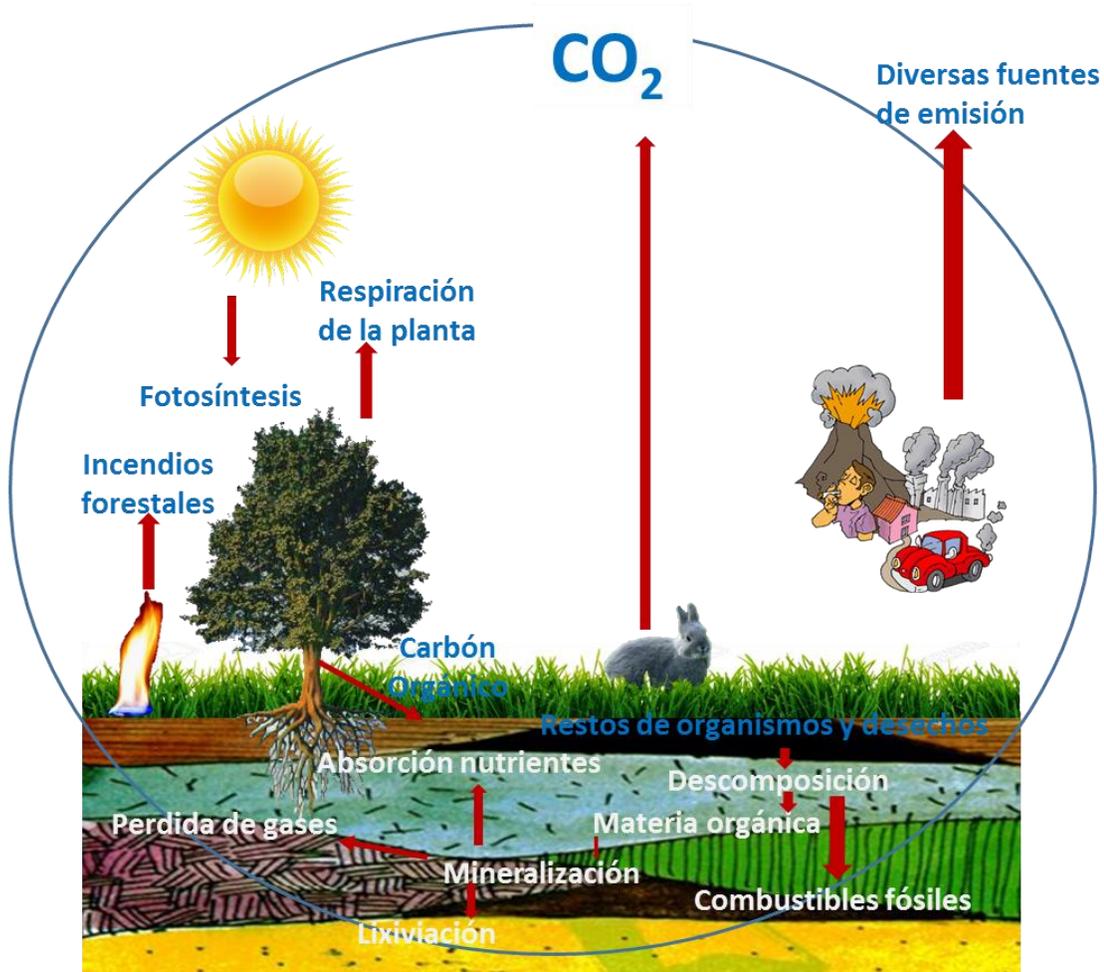


Figura 2. Ciclo del Carbono. Fuente: Elaboración propia.

Los lineamientos y regulaciones sobre estudios, muestreo y análisis en México, se enmarcan en la NOM-021-RECNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, útil para conocer el diseño, tamaño de muestra, colecta y volumen a extraer, dentro de dicha norma se encuentran valores de referencia para realizar la clasificación de las concentraciones de los macro y micro elementos.

Existen a la fecha una serie de investigaciones llevadas a cabo entorno a la temática de estudio, mismas que hacen referencia a la dinámica de carbono y nitrógeno por separado, realizando la caracterización de los suelos de acuerdo a la vegetación imperante, algunos de estos analizan la influencia de un grado de pendiente y describen la unidad de suelo como co-factor en los resultados que se obtienen en los estudios. Tal es el caso de Thiers y Gerding (2007), quienes presentaron la variabilidad de las relaciones topográficas y edáficas en sitios con presencia de *Nothofagus betuloides* y especies arbóreas asociadas en el suroeste de Tierra de Fuego, Chile, encontrando que la relación del suelo con la topografía está estrechamente ligada con las características climáticas (temperatura y humedad) de los sitios, y los suelos más fértiles por su mayor profundidad y mejor drenaje se ubicaron en terrenos de menor elevación y pendiente (< 5 %), los bosques puros de *N. betuloides* se desarrollan en un amplio rango topográfico y mayor variación de suelos.

Por su parte, Anaya *et al.*, (2016) realizaron un estudio en un bosque de niebla en Michoacán para conocer el contenido de carbono orgánico bajo tres tipos de suelo identificados como Andosol, Alisol, Umbrisol, consideraron diferentes posiciones de ladera, fueron caracterizados ocho perfiles de 1 m de profundidad; el contenido de CO osciló de 92 a 152 Mg ha<sup>-1</sup>, no encontrándose diferencias de contenido entre grupos de suelo. En el Sur-Oriente de Colombia se llevó a cabo un estudio en áreas de regeneración natural que estaban bajo un uso pecuario para conocer el potencial de almacenamiento de carbono, encontrando valores de CO de 91.7 Mg ha<sup>-1</sup> de las cuales 57.3 Mg ha<sup>-1</sup> se localizan en el suelo hasta una profundidad de 30 cm (Orjuela *et al.*, 2010).

La mineralización del carbono y nitrógeno en el suelo fue estudiada por Rivas *et al.*, (2009) en un bosque de *Nothofagus obliqua* y una plantación de *Pinus radiata*, del centro-sur de Chile, evaluándose la tasa de mineralización durante dos años, 2003-2005, sus resultados demostraron que la mineralización del nitrógeno y carbono presentaron un comportamiento estacional, las mayores cantidades se localizaron en los meses de primavera-verano; el bosque de *N. obliqua* obtuvo

mayores valores que el bosque de *P. radiata*, esto tal vez se deba a la composición y características químicas de la hojarasca de *Nothofagus obliqua*, así como también se encontró que la plantación de *P. radiata* cambia la química y la relación C/N del suelo con una menor tasa de descomposición de la MO.

Wei *et al.*, (2010), evaluaron los cambios del carbono orgánico y nitrógeno total del suelo después de 28 años de forestación en áreas de praderas en una zona árida de la ciudad de Shenmu en China, con el objetivo de conocer el efecto de las especies arbóreas establecidas, la posición de la pendiente y unidad de suelo. Las plantas utilizadas fueron *Pinus tabulaeformis* y *Caragana korshinskii*, la pendiente fue clasificada como superior, media e inferior y las ordenes de suelo encontradas fueron castañozem, loessiales y eólicos. De acuerdo a sus resultados para la posición superior de la ladera se encontraron valores bajos en carbono y nitrógeno total para el pino, mientras que para la pendiente media sus contenidos fueron similares para ambas especies, la parte baja de la ladera presento mayores cambios de CO y nitrógeno debido a la acumulación y arrastre de los elementos por su ubicación en la ladera. Los efectos de la forestación de pastizales fueron positivos en los cambios observados para carbono y nitrógeno total en el suelo.

Griffiths *et al.*, (2009), realizaron un estudio en las montañas de Oregón en Estados Unidos para conocer los efectos de la topografía sobre las características del suelo forestal, en el marco de que el suelo y sus propiedades tienen implicaciones en el cambio climático, se hicieron mediciones en 180 sitios durante los años 1994-1998, como son altura, humedad, precipitación anual, MO, nitrógeno mineralizable, actividad microbiana, densidad aparente, pH, entre otras. Los resultados obtenidos fueron, el carbono y nitrógeno mineralizable se secuestró preferentemente más en zonas de mayor altitud, ello podría ser de vital importancia como zonas potenciales para la absorción de gases de efecto invernadero; mencionan de igual manera que el gradiente de elevación, genera cambios en las variables climáticas, pero no influye en los suelos de la misma manera.

Siguiendo esta misma línea, Lozano *et al.*, (2016), llevaron a cabo un estudio para medir el impacto del factor topográfico y la vegetación en los reservorios de carbono orgánico y nitrógeno en el suelo en áreas naturales del Mediterráneo, se analizaron cuatro aspectos de ubicación del terreno, norte, sur, este y oeste, bajo dos comunidades vegetales diferentes (bosques nativos y áreas reforestadas), en el Parque Natural Despeñaperros en España, fueron seleccionados seis sitios, dos en las zonas nativas y cuatro en las áreas reforestadas, cinco perfiles de suelo fueron muestreados en cada uno de los sitios, sus propiedades se caracterizaron a diferentes profundidades de 0-25, 25-50 y 50-75 cm. Los resultados mostraron que el bosque nativo en comparación con las áreas reforestadas obtuvo mayores contenidos de carbono orgánico y nitrógeno, las posiciones encontradas al norte y este, presentaron mayores contenidos que aquellas localizadas al sur y oeste, esto se debió a la insolación que influyó sobre la humedad y temperatura del suelo. Los contenidos de carbono y nitrógeno disminuyeron con la profundidad, se observó que la capa de 0-25 cm contenía el 59% del total del carbono orgánico.

Were *et al.*, (2016) realizaron un modelado espacial de la distribución del carbono orgánico y nitrógeno total del suelo en la Reserva Forestal Oriental de Mau en Kenya, con el objetivo de cartografiar los patrones espaciales y cuantificar el CO y nitrógeno a una profundidad de 30 cm mediante el uso de herramientas de SIG y modelos estadísticos; en general la Reserva Forestal Oriental de Mau almacenó aproximadamente 6.81 Tg de CO y 0.69 Tg de N, las mayores estimaciones se localizaron en áreas ubicadas al noroeste y occidente donde domino la cobertura de bosque mientras que las más bajas, se encontraron en las zonas que han sufrido degradación. Yohannes *et al.*, (2015) llevaron un estudio similar en Etiopia, reportando valores similares de carbono, mencionan que el conocer los almacenes de CO de los bosques es crucial pues se identifican zonas potenciales que auxilien en la mitigación del cambio climático.

En México son muy pocos los trabajos que han sido desarrollados bajo este enfoque, de ahí que no se encuentre referencia alguna sobre la importancia de

que tiene la particularidad de interacción de las variables cobertura vegetal, pendiente del terreno y profundidad del suelo, sobre el contenido de carbono y nitrógeno.

## **2.1 Literatura Citada**

Acosta M.M., Carrillo A. F., y Gómez V. R. G. (2011), Estimación de biomasa y carbono en dos especies de bosque mesófilo de montaña, Revista mexicana de ciencias agrícolas, 2(4), 529-543.

Anaya C.A., Mendoza M., Rivera M., Páez R. y Olivares M.L.D. (2016), Contenido de Carbono Orgánico y Retención de Agua en Suelos de un Bosque de Niebla en Michoacán, México, Revista Agrociencia: Vol 50, 251-269.

Brown, S., (1997), Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer UN FAO Forestry Paper 134, Rome, pp 55

Cabrera L. M. (2007), Mineralización y Nitrificación: Procesos Claves en el Ciclo del Nitrógeno, en Simposio Fertilidad 2007, IPNI Cono Sur/Fertilizar AC, Rosario. 1-18 pp.

Cerón R.L.E. y Gutiérrez A. F.A. (2012), Dinámica del ciclo del nitrógeno y fósforo en suelos. Revista Colombiana de Biotecnología: Vol. 14 (1), 1-10.

Challenger, A., y J. Soberón. 2008. Los ecosistemas terrestres, Capítulo 3, Capital natural de México, vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad. CONABIO, México, 87-108 pp

Chapela F., (2012), Estado de los Bosques de México, México, Consejo Civil Mexicano para la Silvicultura Sostenible A.C., Editorial CCMSS, 217 p.

CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad), (2012 b), Procesos ecológicos, ciclos de nutrientes, septiembre, 2016, Recuperado en sitio web: <http://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/procesose.html#CicloNutrientes>.

CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad), (2012a), Ecosistemas de México, Biodiversidad Mexicana, Recuperado en sitio web: <http://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/ecosismex.html>, Septiembre, 2016.

CONAFOR (Comisión Nacional Forestal), (2015), Guía para la caracterización y clasificación de hábitats forestales, Primera edición, Jalisco, México, 115 pp.

FAO (2002), Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la alimentación, Roma. 61 pp.

FAO (2009), Guía para la descripción de suelos, Roma, 4ta edición, 99 p.

FAO (2015), Los bosques y suelos forestales, Recuperado en sitio web: <http://www.fao.org/soils-2015/news/news-detail/es/c/285875/>, 20 Abril, 2017.

García Arrese, A.M.; Macías Vázquez, F. 1993. Incorporación de nutrientes a través de la hojarasca en sistemas forestales. Congreso For. Español. Lourizán, I: 319-322. España.

García, Y, Ramírez, Wendy, & Sánchez, Saray. (2012). Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso. *Pastos y Forrajes*, 35(2), 125-138. Recuperado en 20 de abril de 2017, de [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0864-03942012000200001&lng=es&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03942012000200001&lng=es&tlng=es).

Gallardo Lancho J.F., (2002), Reciclaje de nutrientes en ecosistemas: aplicaciones agronómicas, VIII Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo, Universidad Técnica de Manabí, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Septiembre, Portoviejo Ecuador, 1-8 pp.

González Parra J., y Candás Villar Ma. A., (2004), Materia orgánica de suelos bajo encinas, mineralización de carbono y nitrógeno, *Revista Invest Agrar: Sist Recur For*, fuera de serie, 75-83.

Grabriels D. y Lobo L. D. (2006), Métodos para determinar granulometría y densidad aparente del suelo. *Venesuelos*, 14(1), 37-48.

Granados Sánchez D., López Ríos G.F., y Hernández García M.A. (2007), Ecología y Silvicultura en Bosques Templados, *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 13 (1): 67-83.

Griffiths R.P., Madritch M.D. y Swanson A. K. (2009), The effects of topography on forest soil characteristics in the Oregon Cascade Mountains (USA): Implications for the effects of climate change in soil properties. *Forest Ecology and Management*. Vol 257: 1-7.

Harold W., y Hocker J.R. (1984), *Introducción a la biología forestal*, México, AGT Editor, 460 p.

Hincapié G. E. y Conrado T. M. (2012). Dinámica del Agua en Andosoles Bajo Condiciones de Ladera. *Rev. Fac.Agr.Medellin*, 65(2) ,6765-6777.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), 2008, Área de Capacitación, Regiones naturales y biogeografía de México., Recuperado en sitio web: <http://www.inegi.org.mx/inegi/SPC/doc/internet/regionesnaturalesbiogeografiamexico.pdf>, Octubre, 2016.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC), (1996), Chapter 5: Land Use Change & Forestry. *Greenhouse Gas Inventory Reference Manual. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Revised Version*. London, vol. 3, 57 p.

Jenny, H., (1941), *Factors of soil formation*. New York, Estados Unidos, McGraw-Hill .270 p.

Leyva P., (2001 a), El Medio Ambiente en Colombia, In, Gómez Eduardo (Eds.) Capítulo 6. Los suelos: estabilidad, productividad y degradación., *suelos y Materia orgánica*. 2a, edición, Colombia, IDEAM, 241-245 p.

Leyva P., (2001 b), El Medio Ambiente en Colombia, In, Mantilla Guillermo (Eds.) Capítulo 6. Los suelos: estabilidad, productividad y degradación: suelos y geomorfología. 2a, edición, Colombia, IDEAM, 234-239 p.

LGDFS, 2015. Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable, Diario Oficial de la Federación, 25 Febrero, 2003. INEGI, 2011. Dirección General de Geografía y Medio Ambiente, Recuperado en sitio WEB, Septiembre-2016: [http://www.inegi.org.mx/saladeprensa/aproposito/2016/bosques2016\\_0.pdf](http://www.inegi.org.mx/saladeprensa/aproposito/2016/bosques2016_0.pdf)

Lozano G. B., Parras A.L y Brevik E.C. (2016), Impact of topographic aspect and vegetation (native and reforested áreas) on soil organic carbon and nitrogen budgets in Mediterranean natural áreas. *Scienc of the Total Enviroment*, Vol: 544: 963-970.

Macías F., (2002), Secuestro de Carbono en suelos y biomasa. Coruña, España, Camps M (eds), 66 p.

Martínez, H. E., Fuentes, E. J., & Acevedo, H. E. (2008). Carbono orgánico y Propiedades del suelo. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, Vol 8, Nº 1 , 68-96.

Miranda F. y Hernández X, E., 1963, Los tipos de vegetación en México y su Clasificación, México, Ediciones Científicas Universitarias, 219 p.

Montero G., Pasalodos T.M., Montoto R., López S.E., Onrubia R., Bravo O.A. y Ruiz P.R., (2013), Contenido de carbono en la biomasa de las principales especies de matorral y arbustados de España, 6 to Congreso Forestal Español, Junio, 2013, ISBN: 978-84-937964-9-5.

Murrell T.S. (2003), Transformaciones de los nutrientes en el suelo, Información agronómicas, Instituto de la Potasa y el Fosforo, Boletín técnico (49), Estados Unidos.

Orellana-Rivadeneira G., Sandoval-Solís M.L., Linares-Fleites G., García-Calderon N.E. y Tamariz-Flores J.V. (2012), Descripción de la Dinámica de

Carbono en Suelos Forestales mediante un Modelo de Reservorios, Revista Avances en Ciencias e Ingeniería: Vol 3(1), Enero/Marzo, 123-135.

Perdonomo, C. y Barbazán, M. (1999). Nitrógeno. Universidad de la República, Facultad de Agronomía, Cátedra de Fertilidad de Suelos. Montevideo, Uruguay. Recuperado en sitio web: <http://www.fagro.edu.uy/fertilidad/publica/Tomo%20N.pdf>, Noviembre, 2016.

Plasencia A. y Corbella R.D. (2002). Química del suelo. Cátedra de Edafología. Facultad de agronomía y zootecnia Universidad nacional de Tucumán. Recuperado en sitio web: <http://www.edafologia.com.ar/Descargas/Cartillas/Nitrogeno%20del%20Suelo%20X.pdf>, Enero, 2017.

Prause, J., Lifschitz A.P. y Toledo D.M, (2003) Dinámica de la mineralización de N, P y K en hojas de *Shinopsis balansae Engl.*, sobre un suelo forestal del Parque Chaqueño Húmedo, Revista de Ciencias Forestales Quebracho (10), 46-52.

Roda F., (1993), Funcionamiento de ecosistemas forestales, la circulación de nutrientes, Congreso Forestal Español, Tomo IV, Universidad Autónoma de Barcelona, España 529-541 p.

Salamanca J.A., y Sadeghian KH.S. (2005), La densidad aparente y su relación con otras propiedades en suelos de la zona cafetera colombiana. Cenicafé 56(4) ,381-397.

Sánchez G. A. y López M. L. (2003), Clasificación y ordenación de la vegetación del norte de la Sierra Nevada, a lo largo de un gradiente altitudinal. Anales del Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, Serie Botánica, 74(1), 47-71.

Sánchez O., Vega E., Peters E. y Monroy V., (2003), Conservación de ecosistemas templados de montaña, INE, México, ISBN: 968-817-610-9. 315 p.

Sancho F. y Villatoro M. (2005). Efecto de la posición en la pendiente sobre la productividad de tres secuencia de suelos en ambientes ústicos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 29(3), 159-174.

Thiers O. y Gerding V. (2007), Variabilidad topográfica y edáfica en bosques de *Nothofagus betuloides* (Mirb.) Blume, en el suroeste de Tierra de Fuego, Chile. *Revista Chilena de Historio Natural*, 80(1), 201-211.

Valladares F. (2004), *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante*, España, ISBN: 84-8014-552-8, 506 p.

Wei X., Shao M., Fu X. y Horton R. (2010), Changes in soil organic carbon and total nitrogen after 28 years grassland afforestation: effects of tree species, slope position, and soil order, *Plant Soil*, Vol: 331:165-179.

Were K., Singh B.R. y Dick O.,B. (2016), Spatially distributed modelling and mapping of soil organic carbon and total nitrogen stocks in the Eastern Mau Forest Reserve, Kenya. *J Geogr. Sci.* Vol: 26 (1):102-124.

White D., y Minang P., (2011). *Estimación de los Costos de Oportunidad de REED+*, Manual de Capacitación. Washington, Banco Mundial.

Yerena Y. J. I., Jiménez P. J., Aguirre C. O. A. y Treviño G. E.J., (2012), Contenido de carbono total en los componentes de especies arbóreas y arbustivas en áreas con diferente uso, en el matorral espinoso tamaulipeco, en México, *Revista Bosque Valdivia*, vol.33 (2):145-152. ISSN 0717-920, DOI: 10.4067/S0717-92002012000200004

Yohannes H., Soromessa T y Argaw M. (2015), Carbon Stock Analysis Along Altitudinal Gradient in Gedo Forest: Implications for Forest Management and Climate Change Mitigation, *American Journal of Enviromental Protection*, Vol: 4(5):237-244.

Zambrano A., Franquis F. e Infante A., (2004), Emisión y captura de carbono en los suelos en ecosistemas forestales, *Revista Forestal Latinoamericana*, 019(35), 11-20.

## CAPÍTULO 3

# INFLUENCIA DE LA PROFUNDIDAD, PENDIENTE Y COBERTURA SOBRE CARBONO Y NITRÓGENO DEL SUELO EN ZOQUIAPAN <sup>1</sup>

### 3.1 RESUMEN

El suelo, es la base de los recursos en los ecosistemas, su estudio y conservación es de vital importancia, se le considera como uno de los reservorios más grande de carbono; los almacenes de carbono y nitrógeno en el suelo varían en función del contenido de materia orgánica y de la cobertura vegetal. El carbono y nitrógeno son considerados parámetros de la fertilidad del suelo así como indicadores de su calidad e impacto, resaltando el papel fundamental de los bosques en su productividad y como una alternativa para mitigar el cambio climático. El objetivo del trabajo fue analizar la concentración y contenido de carbono, nitrógeno, amonio, nitrato y relación carbono/nitrógeno en el suelo bajo la influencia de las coberturas de oyamel, pino y pino-aile, tres profundidades y tres pendientes en la Estación Forestal Experimental de Zoquiapan, México. Se identificaron nueve unidades de muestreo a las cuales se les aplicó un análisis de varianza y comparación de medias de tratamiento con LSD ( $\alpha=0.05$ ). Los resultados obtenidos mostraron diferencias significativas entre el tipo cobertura vegetal e interacción con pendiente y profundidad, con mayores almacenamientos de carbono y nitrógeno en los primeros 10 cm, disminuyendo los valores conforme aumentó la profundidad, siendo la cobertura oyamel que presento mayor contenido de carbono en el suelo con  $114.01 \text{ Mg ha}^{-1}$ , y para el caso de nitrógeno total fue el bosque de oyamel y pino aile con  $8.38$  y  $7.95 \text{ Mg ha}^{-1}$ . Respecto a la conformación de las muestras de suelo, simples y compuestas se tuvo que existieron diferencias mayores al 10 % en los contenidos de carbono y nitrógeno.

**Palabras clave:** Carbono, concentración, contenido, nitrógeno, suelo, cobertura.

---

<sup>1</sup> Tesis de Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo.  
Autor: Susana Madrigal Reyes.  
Director de Tesis: Dr. David Cristóbal Acevedo.

## **INFLUENCE OF DEPTH, SLOPE AND COVER ON SOIL CARBON AND NITROGEN IN ZOQUIAPAN**

### **3.2 ABSTRACT**

Soil is the basis of all resources in ecosystems, so its study and conservation is of vital importance. Soil is considered to be one of the largest reservoirs of carbon. Carbon and nitrogen stores in soil can vary depending on the organic matter content and plant cover. Both elements are considered as parameters of soil fertility, as well as indicators of its quality and impact, highlighting the importance of forests in soil productivity and as an alternative to mitigate climate change. The objective of this research was to analyze the carbon, nitrogen, ammonia, and nitrate concentrations and contents, as well as the carbon/nitrogen ratio, in soil under influence of three cover types (oyamel, pine and pine-alder), three depths, and three slopes at the Experimental Forest Station in Zoquiapan, Mexico. Nine sample units were identified and subjected to an analysis of variance and treatment means comparison with LSD ( $\alpha = 0.05$ ). The results show significant differences between plant cover type, and interaction with slope and depth of sampling, finding the greatest carbon and nitrogen stores in the first 10 cm and decreasing values as depth increased. The oyamel cover had the highest carbon content in the soil ( $114.01 \text{ Mg ha}^{-1}$ ). In relation to total nitrogen content, the oyamel and pine-alder forests presented the greatest concentrations with 8.38 and 7.95  $\text{Mg ha}^{-1}$ , respectively. Regarding the formation of simple and compound soil samples, there were differences greater than 10 % in carbon and nitrogen contents.

Keywords: Carbon, concentration, content, nitrogen, soil, cover.

### 3.3 INTRODUCCIÓN

El flujo de nutrientes en el suelo es un proceso que depende de elementos de un ecosistema tal como cobertura vegetal, relieve, suelo, agua, microorganismos, entre otros. El conocimiento de la concentración de la materia (MO) orgánica es esencial para entender los flujos de carbono (CO) y nitrógeno (N) (Matus y Maire, 2000). Valtera *et al.*, (2015) mencionan que los factores, pendiente, exposición de la ladera y cubierta forestal son de importancia ya que explican los procesos que ocurren en el suelo, entre ellos la dinámica de los elementos.

La vegetación es sin duda una de las características más distintivas de los suelos forestales, contribuye en sus propiedades físicas, químicas y biológicas (Rivas *et al.*, 2009). El nitrógeno forma parte de residuos vegetales y animales depositados en el subsuelo que pasa por un estado de degradación y se almacena en la MO; dependiendo de su forma química y cantidad, puede cumplir su función como nutriente mejorando el crecimiento y la productividad o como toxina produciendo un daño ecológico, las necesidades de nitrógeno varían dependiendo del ecosistema, así como también se pueden ver limitadas por su disponibilidad (NADP, 2000).

La MO, el CO y el N constituyen parámetros para el conocimiento de la fertilidad del suelo. Bastidas (2000) describe el término fertilidad como la capacidad del suelo para suministrar a las plantas los elementos nutritivos para su desarrollo, entendiendo que la mayor o menor concentración está determinada por la presencia y comportamiento de las condiciones ambientales. Anaya *et al.*, (2016) mencionan que la ubicación topográfica, pendiente y composición florística influyen en la variación de CO, encontrando que la concentración de carbono decreció con la profundidad del suelo, y reportaron que aproximadamente el 55% del carbono total se concentra en los primeros 30 cm. Ávila *et al.*, (2004), señalaron que la concentración de N en forma  $\text{NO}_3^-$ , se redujo conforme aumentaba la profundidad del suelo y pendiente del terreno, esto se debió principalmente a su adsorción por los coloides del suelo por debajo de los 80 cm de profundidad.

El N y CO son considerados indicadores de la calidad del suelo, pues al ser capturados y almacenados, se presentan como una alternativa para mitigar el cambio climático ante el abatimiento de los gases de efecto invernadero (Orellana, *et al.*, 2012). El CO almacenado en los primeros 100 cm es de 1462-1548 Pg (1 Pg =  $1 \times 10^{15}$  g) en el planeta (Batjes, 1996), este carbono forma uno de los principales compartimentos terrestres, mayor que el carbono biótico y que el atmosférico (Peris, 2013).

Orjuela *et al.*, (2010), determinaron el contenido de carbono orgánico en zonas de regeneración natural, encontrándose depósitos de  $57.3 \text{ Mg ha}^{-1}$  de CO a una profundidad de 30 cm, consideraron estas áreas con potencial de almacenamiento para la captura de CO<sub>2</sub>. Ávila *et al.*, (2001) y Anaya *et al.*, (2016) mencionan como una de las funciones ecológicas y ambientales de las masas forestales la captura de carbono atmosférico en el suelo. De acuerdo a lo anterior las zonas boscosas cobran mayor importancia que aquellos sitios que están desprovistos de vegetación. Rivas *et al.*, (2009) mencionan que el cambio de uso de suelo afecta los niveles de CO y N en el suelo, a través de la aceleración de los procesos de oxidación, que alteran la cantidad y composición de la MO, estos cambios varían de acuerdo al clima, suelo, vegetación e intensidad de prácticas de manejo. Por su parte Celaya *et al.*, (2015) señalan que el cambio de uso de suelo es el principal factor de degradación de los ecosistemas naturales, ya que observaron variaciones en el almacenamiento de N con pérdidas anuales de  $12.5 \text{ kg ha}^{-1}$ , debido a la transformación del ecosistema natural a pastizales, encontrándose mayores concentraciones de nitrógeno total en suelos bajo árboles que espacios abiertos y bajo pastos.

Debido a la importancia de las zonas forestales por su capacidad de generar bienes ecosistémicos y mitigación de efectos de los desastres naturales imperantes en la actualidad, es de gran valor su preservación y aplicación de políticas públicas que conserven estas áreas, así como también es trascendental contar con información sobre el almacenamiento de nutrientes en el suelo, caso particular carbono y nitrógeno que sirvan como línea base para la

formulación de proyectos de tipo ambiental; dada la diversidad de elementos fisiográficos que tiene México, el objetivo de esta investigación fue determinar la influencia que tienen los factores: profundidad, pendiente y cobertura en la concentración y contenido de carbono, nitrógeno total, amonio, nitrato y relación carbono/nitrógeno en el suelo en los bosques de Zoquiapan, México.

### **3.4 MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.4.1 Área de estudio**

El área de estudio se ubica entre los paralelos 19°12'30" y 19°20'00" L.N., y 98°42'30" y 98°30'00" de L.O en la Estación Forestal Experimental Zoquiapan (EFEZ), comprende parte del Estado de México y Puebla, (Figura 3). Cuenta con una superficie de 1638 hectáreas y altura media de 3284 msnm. El clima de acuerdo a la clasificación de Köppen modificado por García es del tipo C (w2) (w) (b') i g, el menos húmedo de los templados subhúmedos con lluvias en verano y la estación más seca en invierno. La temperatura media anual es de 11.1 °C y precipitación anual promedio de 964.1 mm.

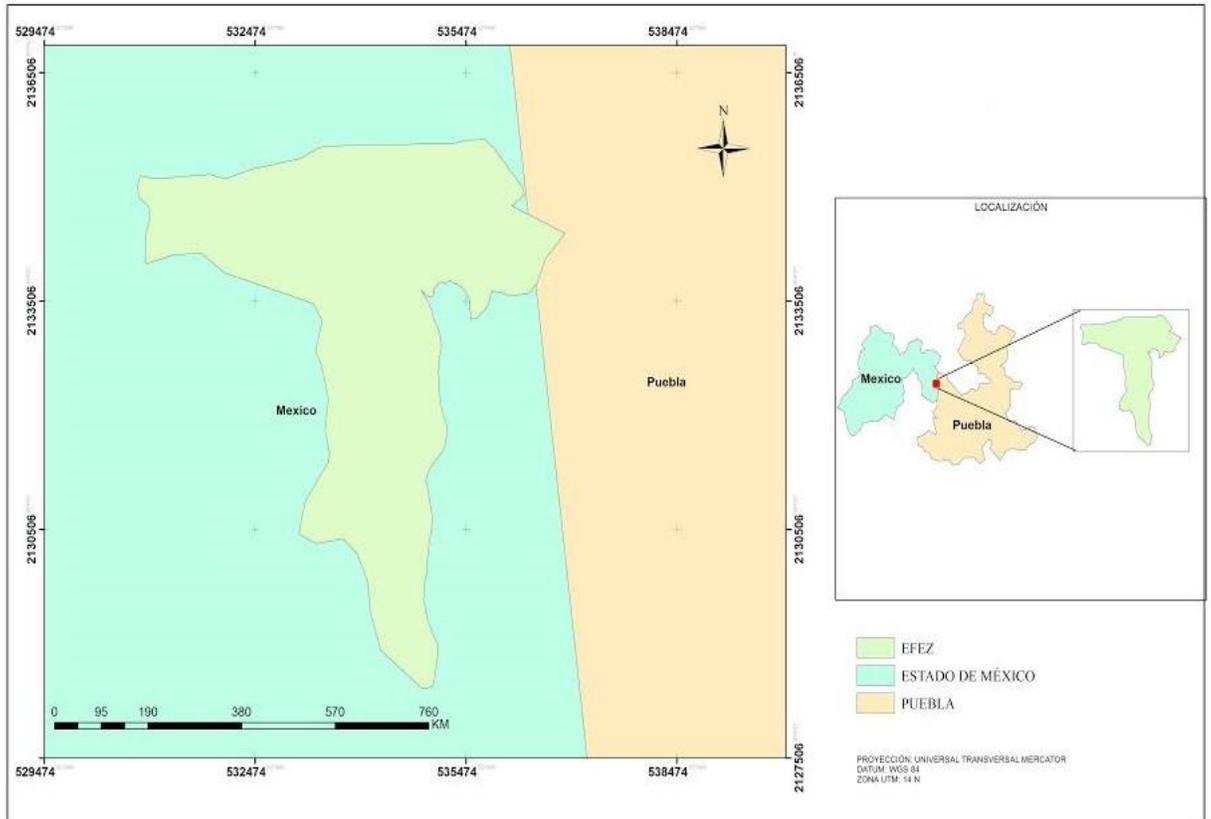


Figura 3. Localización de la Estación Experimental Forestal Zoquiapan, UCh.

Fuente: Elaboración propia.

La geología está compuesta principalmente de material ígneo de tipo andesítico. El relieve predominante es montañoso, con algunos llanos, variando la pendiente de 2 % a 50% (Vega, 1982).

Los suelos de la Estación Experimental Forestal Zoquiapan se clasifican como Andosoles mólicos, suelos con buena aeración, buen drenaje, consistencia friable y ligeramente pegajosa y plástica; pH con valores que oscilan de 5.06-6.3, moderadamente ácidos, buena disponibilidad de nutrientes, fosforo, potasio, calcio y magnesio con concentraciones de 2.4 mg kg<sup>-1</sup>, 203.3 mg kg<sup>-1</sup>, 895.1 mg kg<sup>-1</sup> y 163.9 mg kg<sup>-1</sup> respectivamente, contenido de materia orgánica que disminuye con la profundidad, buena retención de humedad, ambiente favorable para microorganismos, buena disponibilidad de nitrógeno y baja concentración de fosforo en forma asimilable (Rey, 1975; Aguilar y Plateros, 2003).

El área se encuentra entre las regiones hidrológicas No. 18 Río Balsas y No. 26 Pánuco. La corriente superficial más importante es el arroyo Aculco que fluye todo el año del sur hacia el noreste.

La vegetación del área de estudio está constituida principalmente por tres comunidades vegetales de alta montaña:

**Bosque de pino:** compuesto principalmente por *Pinus hartwegii*, ampliamente distribuido por toda el área cubriendo el 65 %. Las características del dosel permiten el crecimiento de diversas especies arbóreas, arbustivas y herbáceas como: *Arbutus xalapensis*, *Alnus jorullensis*, *Senecio spp.*, *Ribes ciliatum*, *Muhlenbergia spp.*, *Agrostis tolucensis*, *Brachypodium mexicanum*, *Bromus spp.*, *Calamagrostis tolucensis*, *Cinna poaeformis*, *Festuca spp.*, *Piptochaetium fimbriatum*, *Poa annua*, *Stipa ichu*, *S. virescens*, *Trisetum spp.*, y otras (Obieta, 1977).

**Bosque de oyamel:** *Abies religiosa* ocupa el 10% del área, tiene un dosel muy cerrado, son pocas las especies que se desarrollan bajo su cobertura frecuentemente asociada con *Pinus* o *Alnus*. Las especies encontradas con mayor frecuencia son: *Senecio platanifolius*, *Salvia cardinalis*, *Corallorhiza spp.*, *Habenaria limosa*, *Malaxis spp.*, *Spiranthes spp.*, *Pyrola secunda*, *Monotropa uniflora*, *M. hypopithys* y *Osmorhiza mexicana*.

**Bosque de Aile:** *Alnus jorullensis* cubre el 24 % del área, se encuentra ampliamente distribuido por toda la estación y en algunos lugares forma masas puras. Tiende a aparecer en áreas recién abiertas por lo que se considera invasora y como parte de la vegetación secundaria inducida por incendios y talas inmoderadas (Herrera y Rodríguez, 1975).

### 3.4.2 Selección de los sitios de muestreo

El diseño de muestreo se determinó con base en la cobertura vegetal y la pendiente del terreno. Los tipos de vegetación se obtuvieron mediante la clasificación supervisada de imágenes Landsat 8 (Path 26 y Row 47).

Las coberturas vegetales se clasificaron en 7 tipos (Figura 4), seleccionándose bosque de pino, bosque de oyamel y la asociación pino-aile, ya que son las asociaciones vegetales que cubren alrededor del 90% de la superficie total de la EFEZ.

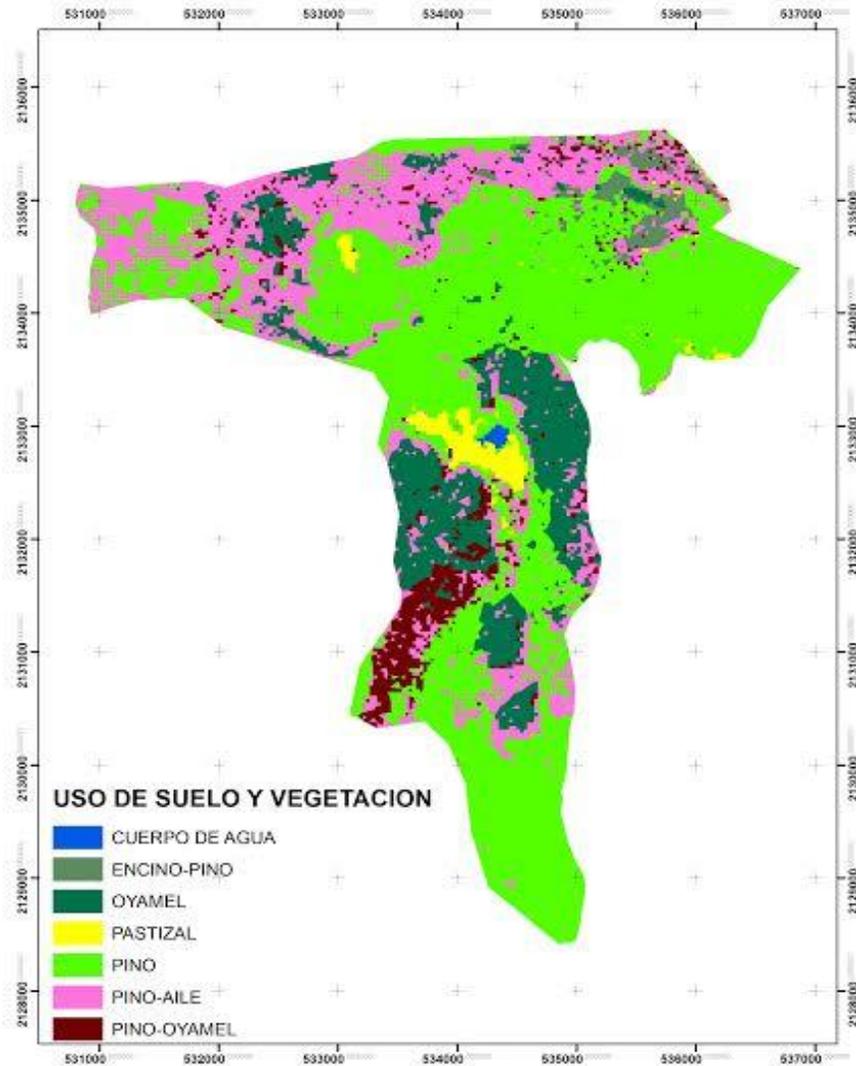


Figura 4. Coberturas de la Estación Forestal Experimental Zoquiapan. Fuente: Elaboración propia.

Para estimar la pendiente del terreno se utilizó el modelo de elevación digital (MED) con resolución espacial de 15 m (INEGI, 2013), mediante el uso del software ArcGIS versión 10.3® y la herramienta “Slope” se generó un archivo

raster con los valores de pendiente del terreno, estos valores se clasificaron en tres categorías; 0-10.10, 10.10-21.16 y 21.16-48.43 grados (Figura 5).

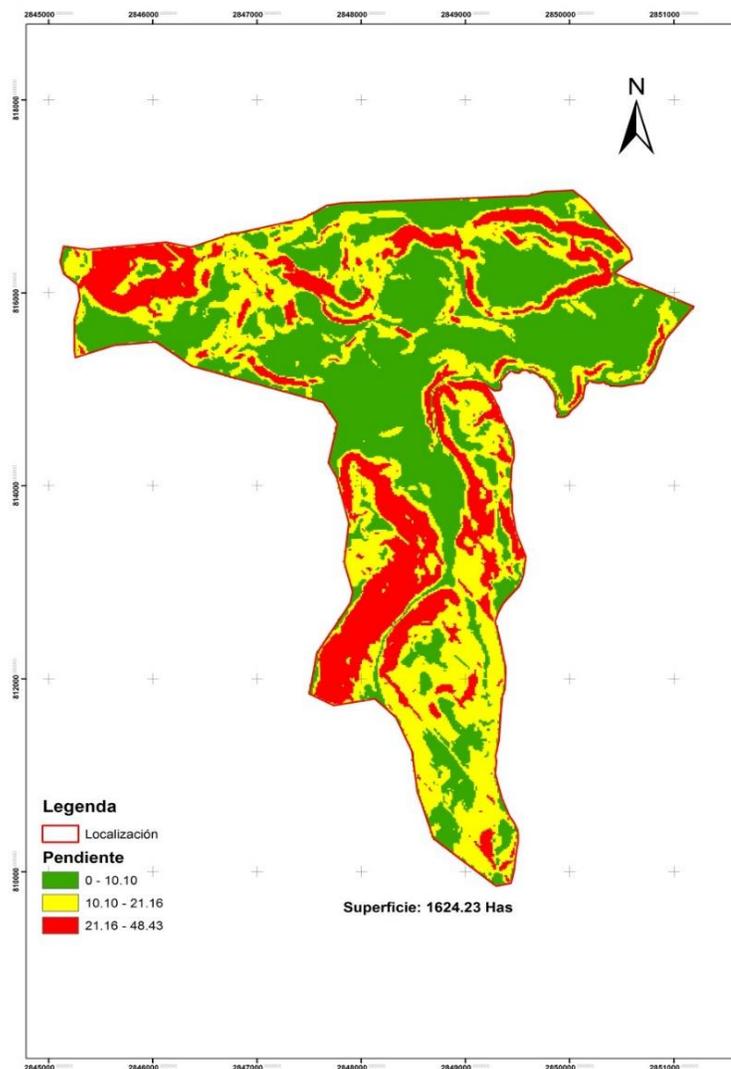


Figura 5. Clasificación de pendiente del terreno en el área de estudio. Fuente: Elaboración propia.

Mediante la intersección de las capas de coberturas y pendiente del terreno se obtuvo un mapa de unidades de muestreo, generándose la información solo para las coberturas seleccionadas anteriormente. En el Cuadro 1 se describen las características de las nueve unidades de muestreo.

Cuadro 1. Unidades de muestreo identificadas.

No.	Unidades de Muestreo	Superficie (Ha)
1	Oyamel pendiente 0-10.10	48.79
2	Oyamel pendiente 10.10-21.16	113.10
3	Oyamel pendiente 21.16-48.43	69.24
4	Pino-aile pendiente 0-10.16	120.34
5	Pino-aile pendiente 21.16-48.43	102.79
6	Pino-aile pendiente 10.10-21.16	143.27
7	Pino pendiente 0-10.10	502.88
8	Pino pendiente 10.10-21.16	260.31
9	Pino pendiente 21.16-48.43	92.79
Total		1,453.52

Para la selección de los sitios de muestreo al interior de las unidades de muestreo se consideró la variabilidad de las condiciones del terreno; que fueran áreas con características homogéneas representativas de los bosques de pino, oyamel y de pino-aile, cercanía entre las unidades (Figura 6), también se consideraron los criterios establecidos por la NOM-021-SEMARNAT-2000.

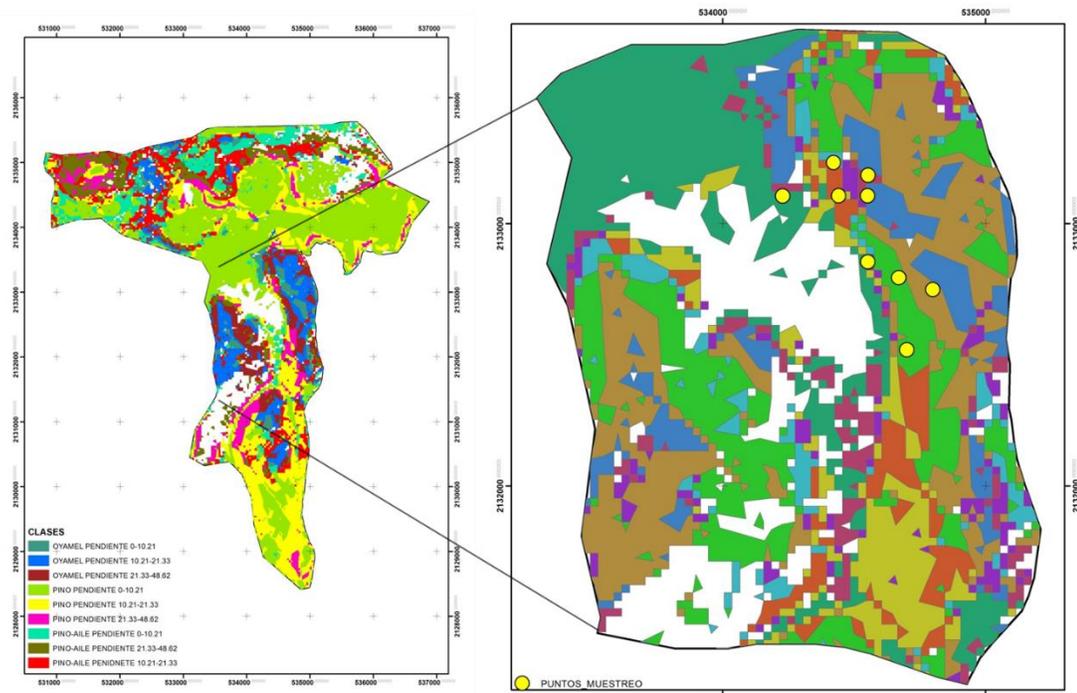


Figura 6. Selección de sitios de muestreo. Fuente: Elaboración propia.

### 3.4.3 Muestreo de suelo

Los materiales utilizados para el trabajo en campo fueron: barrena de cilindro, barrena tipo holandés, clinómetro, GPS y cámara fotográfica.

Se establecieron sitios aleatorios circulares de 400 m<sup>2</sup>, compensados por la pendiente y georreferenciados (Cuadro 2). Dentro de cada sitio se extrajeron muestras de suelo a las profundidades: 0-10, 10-20 y 20-30 cm, por cada rango se obtuvieron dos muestras; una para la determinación de valores de densidad aparente mediante el método del volumen conocido, para lo cual se utilizó la barrena de cilindro y la otra para la obtención de las propiedades químicas del suelo, estas muestras se tomaron con una barrena tipo holandés. En total se obtuvieron 162 muestras.

Cuadro 2. Georreferenciación de sitios de muestreo en el área de estudio.

No.	Unidades de Muestreo	Coordenada X	Coordenada Y	Altura (msnm)
-----	----------------------	-----------------	-----------------	------------------

1	Oyamel pendiente 0-10.10	534700	2132519	3314
2	Oyamel pendiente 10.10-21.16	534800	2132749	3348
3	Oyamel pendiente 21.16-48.43	534670	2132793	3317
4	Pino-aile pendiente 0-10.16	534553	2133185	3304
5	Pino-aile pendiente 21.16-48.43	534551	2133106	3305
6	Pino-aile pendiente 10.10-21.16	534441	2133106	3288
7	Pino pendiente 0-10.10	534422	2133232	3295
8	Pino pendiente 10.10-21.16	534228	2133105	3288
9	Pino pendiente 21.16-48.43	534552	2132854	3291

Nota: Coordenadas UTM Zona 14 N, Datum WGS84.

#### **3.4.4 Determinaciones Físicas y Químicas**

Para determinar la densidad aparente, las muestras fueron secadas a la estufa a  $110 \pm 5$  °C por 24 horas y/o hasta alcanzar un peso constante. Después de que alcanzaron el peso constante, el material se clasificó y dividió en restos vegetales, piedras y gravas, y suelo, se pesó el material correspondiente a suelo para la determinación de su volumen.

Las muestras para la determinación de propiedades químicas se secaron al ambiente y tamizaron a través de malla de 2 mm.

Con el objetivo de conocer las variaciones de concentración y contenido de carbono y nitrógeno cuando se muestrea a una profundidad y cuando se hace por estratos cubriendo la misma profundidad, se analizaron muestras simples de cada profundidad y compuestas (mezcla de las muestras simples de las tres profundidades).

Se obtuvieron un total de 81 muestras simples y nueve compuestas, la metodología utilizada para la determinación de las propiedades químicas y físicas se basó en la NOM-021-RECNAT-2000. (DOF, 2002). A las muestras compuestas además de determinar carbono orgánico, nitrógeno total, nitrógeno

inorgánico (amonio, nitratos) también se obtuvo el pH, fósforo, potasio, calcio y magnesio.

El Carbono orgánico (CO), se estimó a partir de la determinación de la materia orgánica mediante el método de Walkley y Black (1934), la concentración del CO fue obtenida por medio del factor de Van Benmelen 1.724, multiplicando este por el porcentaje de materia orgánica, ya que se supone que la MO del suelo contiene un 58% de carbono. La estimación del contenido de carbono orgánico total en el suelo se calculó con base en la siguiente ecuación (González *et al.* 2008):

$$\text{COS} = \text{Co} * \text{Dap} * \text{Ps},$$

Donde:

COS=carbono orgánico total en suelo por superficie ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ); Co=Concentración de carbono en el suelo (%); Dap= Densidad aparente ( $\text{g/cm}^3$ ); Ps= profundidad del suelo (cm).

El nitrógeno total se determinó por arrastre de vapor con el procedimiento micro-Kjeldahl. El amonio por oxidación con óxido de magnesio y destilado por arrastre de vapor. Nitrato a través de reducción con aleación de devarda y destilación por arrastre de vapor. El nitrógeno se expresa usualmente como; nitrógeno total en % y  $\text{Mg ha}^{-1}$ , el amonio y el nitrato en  $\text{mg kg}^{-1}$  de suelo o en ppm. El contenido de nitrógeno total en el suelo se estimó a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{Nitrógeno total (Mg ha}^{-1}\text{)} = \text{N-tot} * \text{Dap} * \text{Ps},$$

Donde:

N-tot = Concentración de nitrógeno en el suelo (%); Dap = Densidad aparente ( $\text{g/cm}^3$ ); Ps= Profundidad del muestreo (cm).

El contenido de nitrato y amonio se obtuvo de la misma manera que el nitrógeno total. Con los datos de concentración de carbono orgánico y nitrógeno total se generó el valor de la relación carbono/nitrógeno (C/N).

### 3.4.5 Análisis de datos

El arreglo de los tratamientos fue un factorial, tres factores con tres niveles fijos,  $3^3$ , con tres repeticiones ( $3 \times 3 \times 3 \times 3 = 81$  muestras). El diseño experimental utilizado fue completamente al azar (Cuadro 3).

Cuadro 3. Factores y niveles de las variables de estudio.

No.	Factores	Niveles
1	Coberturas	Pino-aile, Oyamel y Pino
2	Pendiente (grados)	0-10.10, 10.10-21.16 y 21.16-48.43
3	Profundidad (cm)	0-10, 10-20 y 20-30

Resultando de la interacción de los factores, 27 combinaciones, el objetivo de la interacción fue indagar el efecto de los factores sobre las variables respuestas.

El modelo estadístico utilizado fue el siguiente:

$$Y_{ijkl} = \mu + \alpha_i + \beta_j + T_k + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha T)_{ik} + (\beta T)_{jk} + (\alpha\beta T)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl};$$

$$i=1, 2,3; j=1,2,3; k=1, 2,3.$$

Donde

$Y_{ijkl}$  = Variable respuesta en la repetición L del nivel i de la cobertura vegetal, nivel j de la pendiente del terreno y nivel k de profundidad.

$\mu$  = Media general del experimento.

$\alpha_i$  = Efecto del nivel i del factor cobertura vegetal.

$\beta_j$  = Efecto del nivel j del factor pendiente del terreno.

$T_k$  = Efecto del nivel k del factor profundidad del suelo.

$(\alpha\beta)_{ij}$  = Efecto de la interacción del nivel i de la cobertura vegetal y el nivel j de la pendiente del terreno.

$(\alpha T)_{ik}$  = Efecto de la interacción del nivel i de la cobertura vegetal y el nivel k de la profundidad del suelo.

$(\beta T)_{jk}$  = Efecto de la interacción del nivel j de pendiente del terreno y el nivel k de la profundidad del suelo.

$(\alpha\beta T)_{ijk}$  = Efecto de la interacción del nivel i de la cobertura vegetal, el nivel j de la pendiente del terreno y el nivel k de la profundidad del suelo.

$\varepsilon_{ijk}$  = Error experimental en la repetición L en el nivel i de la cobertura vegetal, el nivel j de la pendiente del terreno y el nivel k de la profundidad del suelo.

Se realizó una prueba de bondad de ajuste para verificar si los datos tenían una distribución normal, seguido de un Análisis de Varianza y comparación de medias de los tratamientos por medio de la prueba Diferencia Mínima Significativa con una probabilidad del 0.5 %. Los análisis estadísticos se realizaron con el software SAS versión 9.4.

### **3.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Con la determinación de la densidad aparente (Dap) se obtuvieron los contenidos de carbono y nitrógeno presentes en los primeros 30 cm del suelo, los valores de Dap oscilaron entre 0.16-0.89 g cm<sup>3</sup>, datos semejantes fueron reportados por Barrera y Rivera (2011) para suelos andosoles de 0.85 a 0.97 g cm<sup>3</sup>.

En el Cuadro 4 se observa que la cobertura vegetal tuvo efecto ( $p < 0.05$ ) sobre la concentración y contenido de carbono y nitrógeno, así como en la concentración de amonio en el suelo, el factor pendiente fue significativo ( $p < 0.05$ ) para la concentración de carbono y amonio y contenido de carbono; referente al impacto de la profundidad, solo las concentraciones de carbono, nitrógeno total y amonio fueron significativos ( $p < 0.05$ ). La interacción de los factores cobertura y pendiente mostraron significancia para la concentración y contenido de carbono, nitrógeno, nitratos, amonio y relación carbono/nitrógeno, mientras que para cobertura-profundidad solo el contenido de carbono fue significativo, en el caso de la interacción de pendiente-profundidad, el efecto se reflejó en las concentraciones de carbono y nitrógeno y contenido de carbono.

Cuadro 4. Análisis de Varianza de la influencia de la pendiente del terreno, cobertura y profundidad del suelo en la concentración y contenido de carbono y nitrógeno en el suelo en Zoquiapan.

Variables respuesta	Efecto de factores						
	Cob	Pend	Cob*Pend	Prof	Cob*Prof	Pend*Prof	Cob*Pend*Prof
	Pr > F						
Concentración CO	<b>&lt;.0001</b>	<b>0.0404</b>	<b>0.0056</b>	<b>&lt;.0001</b>	0.9545	<b>0.0269</b>	0.2574
Contenido CO	<b>0.0005</b>	<b>0.032</b>	<b>0.0009</b>	0.0542	<b>0.006</b>	<b>0.0362</b>	0.2557
Concentración Nt	<b>0.0008</b>	0.5247	0.2933	<b>&lt;.0001</b>	0.1862	<b>0.0171</b>	0.4284
Contenido Nt	<b>&lt;.0001</b>	0.0937	<b>0.0121</b>	0.1417	0.1436	0.0592	0.5431
Concentración							
Nitratos	0.1194	0.0755	<b>&lt;.0001</b>	0.7329	0.2481	0.2155	0.4354
Contenido nitratos	0.158	0.3184	<b>&lt;.0001</b>	0.3172	0.2414	0.3042	0.2234
Concentración							
Amonio	<b>0.0213</b>	<b>0.0374</b>	0.5208	<b>0.0004</b>	0.1545	0.432	0.9797
Contenido Amonio	<b>0.0013</b>	0.0522	0.1067	0.3598	0.1501	0.8301	0.7708
Relación C/N	0.3925	<b>0.0003</b>	<b>&lt;.0001</b>	0.1338	0.1312	0.8874	0.8962

Nota: ANOVA, (P <0.05), Nota: Cob (cobertura), Pend (pendiente), Prof (profundidad), Nt (Nitrógeno total).

### **3.5.1 Concentración y Contenido de Carbono orgánico en el suelo**

De acuerdo a lo obtenido de las variables respuestas (concentración y contenido) para el caso del carbono localizado en el suelo, realizando un análisis del efecto de los factores (Cuadro 5) se encontró diferencia significativa en su almacenamiento, para las coberturas de pino-aile y oyamel con 10.27 %, 9.48% respectivamente de concentración; referente al factor profundidad los primeros 20 cm es en donde se tiene mayor deposición con valores medios de 8-10.6 % para el caso de la pendiente del terreno la segunda clasificación (10.10-21.16 grados) fue la mejor, encontrándose 9.3 % de carbono.

La interacción de dos y tres factores permitió evidenciar la contribución de cada uno de estos en la concentración y contenido, la interacción de los factores cobertura-pendiente arrojó cuatro grupos, siendo el de mayor significancia el bosque de pino-aile con pendiente de 0-10.10 grados con 11.60 % de CO, seguido de la cobertura de oyamel con las tres clasificaciones de pendiente, registrándose valores medios que oscilaron de 9.42-9.55 %. Mientras que para los factores cobertura-profundidad se formaron 8 grupos, donde el área cubierta de pino-aile y oyamel en los primeros 20 cm fueron los que presentaron mayor deposición con 10.13-12.13 % de CO, para el caso de la interacción pendiente-profundidad se conformaron nueve grupos, la pendiente de 21.16-48.43 grados en la primera profundidad (0-10 cm) fue significativamente diferente al registrar el valor medio de 11.62 %, para el caso de la interacción de los tres factores, los mejores resultados se presentaron bajo la cobertura forestal de oyamel con una pendiente mayor de 21.16 grados en los primeros 10 cm con 14.69%, seguido del ecosistema pino-aile reportándose valores medios de 13.593 %, 13.083 % y 12.246 % de CO (Cuadro 5).

Cuadro 5. Mejores tratamientos para la concentración y contenido de carbono en el suelo del área de estudio.

	Factores		Cob*Pend		Cob*Prof		Pend*Prof		Cob*Pend*Prof	
Concentración carbono (%)	PA	10.275 a	PA-1	11.606 a	PA-P1	12.13 a	3-P1	11.621 a	O-3-P1	14.69 a
	O	9.48 a	PA-2	10.214 ba	O-P1	11.86 a	2-P1	10.838 ba	PA-3-P1	13.593 ba
	P	5.533 b	O-3	9.552 ba	PA-P2	10.134 ba	1-P1	9.34 bac	PA-1-P1	13.083 bac
	2	9.339 a	O-2	9.465 ba	O-P2	9.098 bc	2-P2	9.074 bdc	PA-1-P2	12.246 bac
	1	8.329 ba	O-1	9.424 ba	PA-P3	8.561 bc	1-P2	8.648 bdc	P-2-P1	11.883 bdac
	3	7.621 b	PA-3	9.004 b	P-P1	7.81 c	2-P3	8.104 edc	O-2-P1	10.92 ebdac
	P1	10.6 a	P-2	8.337 b	O-P3	7.483 c	1-P3	6.998 edf	PA-2-P2	10.61 ebdc
	P2	8.011 b	P-3	4.306 c	P-P2	4.801 d	3-P2	6.311 ef	PA-2-P3	10.32 ebdfc
	P3	6.678 c	P-1	3.956 c	P-P3	3.99 d	3-P3	4.931 f	O-1-P2	10.06 ebdfcg
Contenido carbono (Mg ha <sup>-1</sup> )	PA	87.910 a	O-3	96.147 a	PA-P2	94.170 a	2-P2	85.670 a	O-3-P1	114.01 a
	O	80.36 a	PA-2	89.981 a	O-P1	91.414 ba	3-P1	79.202 ba	PA-2-P2	110.65 a
	P	42.567 b	PA-1	87.490 a	O-P2	90.983 ba	1-P2	75.081 bac	PA-1-P2	103.08 a
	2	77.249 a	O-2	84.465 a	O-P3	81.334 bac	2-P3	74.898 bac	PA-2-P3	102.56 a
	1	67.409 a	O-1	83.118 a	PA-P3	79.234 bac	2-P1	71.178 bac	O-3-P2	94.893 ba
	3	66.18 a	PA-3	63.608 a	PA-P1	67.675 bc	3-P2	65.247 bc	O-1-P2	91.464 ba
	P2	75.333 a	P-2	57.300 a	P-P1	54.600 bc	1-P3	63.837 bc	O-2-P1	89.185 ba
	P1	71.229 ba	P-3	38.784 a	P-P2	40.845 bc	1-P1	63.308 bc	O-1-P3	86.841 ba
	P3	64.275 b	P-1	31.618 a	P-P3	32.257 c	3-P3	54.090 c	O-2-P2	86.592 ba

Nota: En cada columna, letras distintas indican diferencias significativas ( $p < 0.05$ ), entre tratamientos. Cob: coberturas (PA: Pino-aile, O: Oyamel, P: Pino), Pend: pendiente (1: 0-10.10, 2: 10.10-21.16, 3: 21.16-48.43 grados), Prof: profundidad (P1: 0-10, P2: 10-20, P3: 20-30 cm).

Raymundo (2008), reportó valores de concentración de carbono orgánico en el horizonte A de un suelo andosol desde un 5.6 a 6.6 30% bajo manejo de temporal, los resultados obtenidos son cercanos a lo que se señaló este autor.

El comportamiento del contenido de carbono del suelo de la Estación Forestal Experimental Zoquiapan, vario de acuerdo al grado de conformación de las áreas y manejo forestal brindado, puesto que al ser las coberturas de oyamel y pino-aile las más compactas y con menos degradación en su interior presentaron mayores contenidos de carbono con 87.91 y 80.36 Mg ha<sup>-1</sup>, que la cobertura de pino (42.56 Mg ha<sup>-1</sup>) la cual durante el recorrido de campo se percató de que tenía un grado de intervención mayor donde se realizan actividades productivas del tipo pecuaria lo cual incidió sobre los resultados obtenidos (Cuadro 5). Castillo *et al.*, (2016), reportaron valores medios de CO en bosque de pino de 73.5 Mg ha<sup>-1</sup> bajo condiciones naturales de conservación, estas diferencias se deben particularmente al manejo del área.

La interacción de los factores cobertura-pendiente permitió identificar cual fue la mejor para el reservorio de COS siendo el bosque de oyamel con pendientes mayores de 21.16 grados con 96.14 Mg ha<sup>-1</sup>, referente a los factores cobertura-profundidad se conformaron 5 grupos, donde la cobertura pino aile en la profundidad de 10-20 cm almacenó 94.17 Mg ha<sup>-1</sup>, mientras que la interacción pendiente-profundidad la pendiente de 10.10-21.16 grados en el rango de profundidad de 10-20 cm se registró el mayor contenido con 85.67 Mg ha<sup>-1</sup> de COS. Al realizarse el análisis de la interacción de los tres factores se encontraron valores de 114.01 y 102.56 Mg ha<sup>-1</sup> siendo las coberturas de oyamel y pino-aile donde se encontraron diferencias significativas.

Por su parte Vela *et al.*, (2012), encontraron contenidos similares en áreas de vegetación nativa de conservación que se caracterizan por la presencia de bosque de oyamel en la Ciudad de México con 145.5 Mg ha<sup>-1</sup>, y bosque de pino con 119 Mg ha<sup>-1</sup>. Pérez *et al.*, (2013), realizaron un estudio en la Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca en el Estado de México donde reportaron contenidos promedio de carbono en el suelo de 153 Mg ha<sup>-1</sup> para áreas

conservadas, mientras que en aquellos bosques que son aprovechados y perturbados se reportaron 95 y 125 Mg ha<sup>-1</sup> de carbono, respectivamente.

González-Molina *et al.*, (2008) señalaron que en la mayoría de los ecosistemas vegetales hay una tendencia a presentar mayor cantidad de COS en la posición inferior de las laderas, de acuerdo a los resultados obtenidos en el estudio el factor pendiente no logró arrojar valores significativos para el contenido COS cuando se analiza el factor independiente, mientras que cuando se ven las diversas interacciones formadas por este, se tienen datos interesantes ya que las pendientes mayores a 21.16 grados, registraron mayores contenidos.

De acuerdo al Panel Intergubernamental del Cambio Climático (1997), en los suelos minerales el cambio en el CO es relativamente pequeño y ocurre principalmente en los primeros 30 cm de la capa del suelo. La concentración de carbono orgánico disminuyó con la profundidad. La respuesta más fuerte de la reserva de carbono en el suelo a los cambios en la cobertura ocurrió en el rango de los 20-30 cm, es así que el mayor contenido de carbono se encontró en los primeros 20 cm.

Cuando se realizó la transformación de concentración a contenido de carbono con el uso de la densidad aparente y la profundidad de la toma de muestra, se encontraron diferencias en los reservorios de carbono para las coberturas forestales esto se debió al uso de esta propiedad física, pues se registraron variaciones de Dap para los diversos tratamientos resultado de las interacciones de los factores, cobertura vegetal, pendiente del terreno y profundidad del suelo.

### **3.5.2 Concentración y Contenido de Nitrógeno en el suelo**

#### **3.5.2.1 Nitrógeno total**

De acuerdo con la clasificación del nitrógeno y nivel de abundancia en el suelo, se identificó que el bosque de oyamel y pino-aile se catalogaron como ricos en este elemento con 0.893 % y 0.847 % de N respectivamente, caso contrario con el bosque de pino el cual presentó un valor de 0.44 % definiéndose en el rango de nivel medio. Concerniente a la pendiente del terreno no existieron diferencias

significativas en el depósito de este nutriente en el suelo, referente a la profundidad de muestreo, el rango de 0-10 cm fue la mejor para la acumulación de nitrógeno total (ver Cuadro 6), esto se debió principalmente a que en los primeros 10 cm del suelo se localizó la materia orgánica.

Cuadro 6. Mejores tratamientos para la concentración y contenido de nitrógeno total en el suelo de la Estación Forestal Experimental Zoquiapan.

	Factores		Cob*Pend		Cob*Prof		Pend*Prof		Cob*Pend*Prof	
Concentración Nitrógeno total (%)	O	0.893 a	PA-1	0.945 a	O-P1	1.157 a	3-P1	1.020 a	O-3-P1	1.459 a
	PA	0.847 a	O-3	0.935 ba	PA-P1	1.004 ba	1-P1	0.866 ba	PA-3-P1	1.214 ba
	P	0.448 b	O-1	0.892 ba	O-P2	0.849 bc	2-P1	0.800 bc	O-1-P1	1.030 bac
	1	0.781 a	O-2	0.850 ba	PA-P2	0.814 bc	1-P2	0.768 bcd	PA-1-P1	1.008 bdac
	2	0.726 a	PA-2	0.816 ba	PA-P3	0.723 c	2-P2	0.739 bcd	O-2-P1	0.983 bdec
	3	0.679 a	PA-3	0.779 ba	O-P3	0.671 c	1-P3	0.710 bcd	PA-1-P2	0.944 bdec
	P1	0.895 a	P-2	0.515 bc	P-P1	0.525 c	2-P3	0.643 ecd	O-1-P2	0.892 fbdec
	P2	0.692 b	P-1	0.507 bc	P-P2	0.414 c	3-P2	0.570 ed	PA-2-P2	0.890 fbdec
	P3	0.600 b	P-3	0.322 c	P-P3	0.405 c	3-P3	0.447 e	PA-1-P3	0.882 fbdec
Contenido Nitrógeno total (Mg ha <sup>-1</sup> )	O	5.502 a	O-3	6.293 a	PA-P2	6.248 a	2-P2	5.665 a	O-3-P1	8.383 a
	PA	5.168 a	PA-1	6.068 a	O-P1	5.904 a	1-P2	5.528 ba	PA-2-P2	7.956 ba
	P	3.074 b	PA-2	5.897 a	O-P2	5.883 a	1-P3	5.092 ba	PA-1-P2	7 bac
	1	5.018 a	O-1	5.22 ba	PA-P3	5.164 ba	3-P1	5.074 ba	PA-2-P3	6.486 bdac
	2	4.718 ba	O-2	4.993 bac	O-P3	4.718 bac	2-P3	4.501 bac	O-3-P2	6.253 ebdac
	3	4.007 b	P-1	3.766 bdc	PA-P1	4.091 bdc	1-P1	4.434 bac	PA-1-P3	6.093 ebdacf
	P2	5.087 a	PA-3	3.537 dc	P-P1	3.502 dc	3-P2	4.066 bac	O-1-P2	5.92 ebdagcf
	P1	4.499 a	P-2	3.264 d	P-P2	3.128 dc	2-P1	3.988 bc	O-1-P3	5.73 ebdhagcf
	P3	4.158 a	P-3	2.192 d	P-P3	2.592 c	3-P3	2.882 c	O-2-P2	5.476 ebdhigcf

Nota: En cada columna, letras distintas indican diferencias significativas ( $p < 0.05$ ), entre tratamientos. Cob: coberturas (PA: Pino-aile, O: Oyamel, P: Pino), Pend: pendiente (1: 0-10.10, 2: 10.10-21.16, 3: 21.16-48.43 grados), Prof: profundidad (P1: 0-10, P2: 10-20, P3: 20-30 cm).

El análisis de la interacción de dos y tres de los factores para la concentración de nitrógeno permitió identificar cuál de estos fueron significativos, dando como resultado para los factores cobertura-pendiente, el bosque de pino-aile bajo la pendiente de 0-10.10 grados con 0.94 % de N, mientras que para cobertura-profundidad el bosque de oyamel en los primeros 10 cm registro valores de 1.15 %; respecto a la pendiente-profundidad se identificó que aquellas zonas con más de 21.16 grados en el rango de 0-10 cm de profundidad se obtuvieron datos de 1.02 %, y para la interacción de los tres factores se registraron datos que oscilaron de 1.21-1-45 % de nitrógeno bajo las coberturas de oyamel y pino aile en pendiente mayores de 21.16 grados en los primeros 10 cm de profundidad del suelo.

Respecto al contenido de nitrógeno en el suelo, la comparación de medias de tratamiento con LSD ( $\alpha = 0.05$ ) permitió identificar cual fue el mejor reservorio, identificándose a las coberturas oyamel y pino-aile con  $5.502 \text{ Mg ha}^{-1}$  y  $5.168 \text{ Mg ha}^{-1}$  respectivamente, no encontrándose diferencia significativa alguna para la profundidad del suelo; se formaron tres grupos para el caso de la pendiente, aquellos lugares donde fue menor a 10.10 grados fueron los mejores para la acumulación de nitrógeno en el suelo  $5.018 \text{ Mg ha}^{-1}$ , disminuyendo conforme avanzó el grado de inclinación de las laderas.

El análisis de la influencia de la interacción de dos y tres factores: cobertura vegetal, pendiente del terreno y profundidad del suelo, se confirmó al encontrarse valores de contenidos con diferencias significativas. La interacción cobertura-pendiente obtuvieron valores de  $6.29 \text{ Mg ha}^{-1}$  de nitrógeno para el bosque de oyamel en pendiente mayores a 21.16 grados, mientras que para los factores cobertura-profundidad, las zonas de pino-aile en pendientes de 10.10-21.16 grados se encontraron valores de  $6.24 \text{ Mg ha}^{-1}$  de N, referente a la interacción pendiente-profundidad, aquellas áreas con valores de 10.10-21.16 grados en el rango de profundidad de suelo de 10-20 cm, almacenó  $5.66 \text{ Mg ha}^{-1}$  de N, cuando se observó la influencia de los tres factores se logró percatar que aquellas áreas

cubiertas por bosque de pino-aile y oyamel presentaron mayores contenidos con 7.95 y 8.38 Mg ha<sup>-1</sup> de N.

De acuerdo a los resultados obtenidos para la cobertura Pino-aile, las zonas cubiertas por especies del género *Alnus*, (*Alnus firmifolia*) en asociación con pino son de valor ecológico por el almacenamiento y fijación de N<sub>2</sub>, debido a ello esta especie se presenta como una alternativa para al manejo de áreas y recuperación de nitrógeno en el suelo (Almaraz *et al.*, 2005).

### 3.5.3 Relación Carbono/Nitrógeno

De acuerdo con los resultados del análisis estadístico y comparaciones de medias de los tratamientos para determinar cuál de estos mostraría una mayor o menor relación C/N se obtuvo que las coberturas correspondientes a oyamel y pino-aile presentaron una mayor relación C/N la cual osciló en un rango de 17.28-19.57 (Cuadro 7), estos valores indicaron poca disponibilidad de nitrógeno para las especies forestales, referente a la cobertura pino e interacciones con los factores pendiente y profundidad de muestreo, este siempre mostró una relación menor que las otras coberturas, con valores que van de 8.363 a 15.346, habiendo con ello de acuerdo a los procesos biogeoquímicos del nitrógeno, disponibilidad de amonio y nitrato en el suelo para la nutrición de las plantas.

Mohedano *et al.*, (2010), mencionan que hay un agotamiento del nitrógeno mineral en el suelo cuando la relación C/N de los residuos orgánicos es alta.

Cuadro 7. Mejores tratamientos para la relación carbono/nitrógeno en el suelo del área de estudio.

Relación C/N	Factores		Cob*Pend		Cob*Prof	
	O	19.570 a	O-3	20.388 a	O-P3	19.674 a
	PA	17.281 a	O-2	19.900 a	O-P2	19.542 a
	P	13.922 a	O-1	18.423 a	O-P1	19.495 a
	2	18.544 a	P-2	18.058 a	PA-P2	17.602 a
	3	17.796 ba	PA-2	17.675 a	PA-P1	17.431 a
	1	14.433 b	PA-3	17.655 a	PA-P3	16.811 a
	P1	17.708 a	PA-1	16.514 a	P-P1	16.199 a
	P2	16.841 ba	P-3	15.346 a	P-P2	13.380 a
	P3	16.224 b	P-1	8.363 a	P-P3	12.187 a

Pend*Prof		Cob*Pend*Prof	
2-P1	19.303 a	O-3-P1	20.660 a
3-P1	18.988 ba	O-3-P3	20.419 a
2-P2	18.188 ba	P-2-P1	20.281 a
2-P3	18.143 ba	O-2-P3	20.155 a
3-P2	17.475 bac	O-3-P2	20.086 a
3-P3	16.926 bac	O-2-P1	19.890 a
1-P2	14.862 bc	O-2-P2	19.656 a
1-P1	14.835 bc	P-3-P1	18.981 a
1-P3	13.603 c	O-1-P2	18.885 a

Nota: En cada columna, letras distintas indican diferencias significativas ( $p < 0.05$ ), entre tratamientos. Cob: coberturas (PA: Pino-aile, O: Oyamel, P: Pino), Pend: pendiente (1: 0-10.10, 2: 10.10-21.16, 3: 21.16-48.43 grados), Prof: profundidad (P1: 0-10, P2: 10-20, P3: 20-30 cm).

### 3.5.4. Nitrógeno inorgánico

El nitrógeno inorgánico es el resultado del balance entre la mineralización y la asimilación por los microorganismos del suelo, la vegetación y el lavado debido a la precipitación. La mineralización del nitrógeno está dada en función del valor de la relación C/N como predictor de la mineralización. De acuerdo a Quantin & Geissert (1988) señalaron que una proporción C/N con valores de 12 a 13, indican una buena mineralización y humificación de la materia orgánica.

#### 3.5.4.1 Amonio

La concentración del amonio en el suelo bajo el efecto de los factores, en particular la cobertura vegetal se comportó de la siguiente manera, el bosque de pino destaco a diferencia del pino-aile y oyamel, con 18.22, 14.44 y 13.53 mg kg<sup>-1</sup> respectivamente, para el caso del factor profundidad en los primeros 10 cm se encuentra la mayor disposición de amonio con 19.62 mg kg<sup>-1</sup>, respecto a la pendiente del terreno, la segunda clasificación (10.10-21.16 grados) mostró diferencia significativa ya que sus valores medios fueron de 18.03 mg kg<sup>-1</sup> (Cuadro 8), la interacción de los factores evidencio diferencias en cada uno de los niveles, siendo los de mayor significancia para la cobertura-pendiente, el bosque de pino bajo pendiente de 10.10-21.16 grados con 22.07 mg kg<sup>-1</sup>, referente a la cobertura-profundidad, las relaciones entre bosques de pino, oyamel y pino-aile en los primeros 10 cm se localizaron las mayores concentraciones de amonio con 20.53, 20.03 y 18.3 mg kg<sup>-1</sup> respectivamente.

Cuadro 8. Mejores tratamientos para la concentración y contenido de amonio en el suelo del área de estudio.

	Factores	Cob*Pend		Cob*Prof		Pend*Prof		Cob*Pend*Prof		
Concentración Amonio (mg kg <sup>-1</sup> )	P	18.222 a	P-2	22.077 a	P-P1	20.533 a	2-P1	24.3 a	P-2-P1	27.233 a
	PA	14.444 b	P-1	18.155 ba	0-P1	20.033 a	1-P1	18.255 b	O-2-P1	23.533 ba
	O	13.533 b	PA-2	16.977 bac	PA-P1	18.3 a	2-P3	16.488 cb	PA-2-P1	22.133 bac
	2	18.037 a	O-2	15.055 bc	P-P3	17.322 ba	3-P1	16.311 cb	P-2-P3	21.033 bac
	1	14.137 b	P-3	14.433 bc	P-P2	16.811 ba	2-P2	13.322 cb	P-1-P1	20.133 bdac
	3	14.025 b	O-3	14.044 bc	PA-P3	14.855 bac	3-P2	13.188 cb	O-3-P1	19.866 ebdac
	P1	19.622 a	PA-3	13.6 bc	O-P2	12.155 bdc	1-P2	12.633 cb	PA-2-P3	19.166 ebdacf
	P3	13.529 b	PA-1	12.755 bc	PA-P2	10.177 dc	3-P3	12.577 cb	P-2-P2	17.966 ebdagcf
	P2	13.048 b	O-1	11.5 c	O-P3	8.411 d	1-P3	11.522 c	PA-1-P1	17.933 ebdagcf
Contenido Amonio (Mg ha <sup>-1</sup> )	P	0.01166 a	P-2	0.01334 a	P-P1	0.01294 a	2-P1	0.01139 a	PA-2-P3	0.01516 a
	PA	0.008057 b	P-1	0.01321 a	P-P2	0.01164 ba	2-P3	0.01098 a	P-1-P1	0.01494 ba
	O	0.00744 b	PA-2	0.01046 ba	P-P3	0.01038 bac	1-P1	0.009854 ba	P-2-P1	0.01398 bac
	2	0.01062 a	O-3	0.008499 ba	PA-P3	0.009727 bac	2-P2	0.009495 ba	P-1-P2	0.0131 bdac
	1	0.008815 ba	P-3	0.008417 bc	O-P1	0.009629 bac	1-P1	0.008942 ba	P-2-P3	0.0131 bdac
	3	0.007716 b	O-2	0.008064 bc	O-P2	0.007792 bdc	3-P1	0.00872 ba	P-2-P2	0.01295 ebdac
	P1	0.009987 a	PA-1	0.007483 bc	PA-P1	0.00739 dc	3-P2	0.008051 ba	O-2-P1	0.01191 ebdacf
	P3	0.008829 a	PA-3	0.006231 c	PA-P2	0.007055 dc	1-P3	0.00765 ba	P-1-P3	0.01158 ebdagcf
	P2	0.008336 a	O-1	0.005756 c	O-P3	0.004898 d	3-P3	0.006376 b	O-3-P1	0.01093 ebdagcf

En cada columna, letras distintas indican diferencias significativas ( $p < 0.05$ ), entre tratamientos. Cob: coberturas (PA: Pino-aile, O: Oyamel, P: Pino), Pend: pendiente (1: 0-10.10, 2: 10.10-21.16, 3: 21.16-48.43 grados), Prof: profundidad (P1: 0-10, P2: 10-20, P3: 20-30 cm).

Respecto a la interacción pendiente-profundidad se identificó que en aquellas zonas con pendientes de 10.10-21.16 en la primer rango de profundidad (0-10 cm) se encontró la mayor concentración con  $24.3 \text{ mg kg}^{-1}$ , en la interacción de los tres factores y respectivos niveles, se presentaron diferencias significativas siendo la cobertura pino con pendiente de 10.21-21.33 grados a una profundidad de 0-10 cm donde hubo una mayor disponibilidad de amonio con  $27.233 \text{ mg kg}^{-1}$ , seguido del bosque de oyamel y pino aile bajo las mismas condiciones de pendiente del terreno y profundidad con  $23.533 \text{ mg kg}^{-1}$  y  $22.133 \text{ mg kg}^{-1}$  respectivamente.

Relativo al contenido de amonio en el suelo para las tres coberturas, pendiente del terreno y profundidad del suelo; su localización se comportó de manera similar a la concentración, siendo el bosque de pino donde hubo mayor amonio con  $0.0116 \text{ Mg ha}^{-1}$ ; aquellas áreas con pendiente de 10.10-21.16 grados fueron las mejores con  $0.01062 \text{ Mg ha}^{-1}$  para el caso de profundidad no se encontraron diferencias significativas. Las interacciones surgidas por los factores y sus niveles, demostraron que no hubo diferencia alguna para el contenido cuando se analizaron dos factores, en la interpretación de tres factores, se formaron tres grupos, siendo la mejor cobertura pino-aile bajo la pendiente de 10.10-21.16 grados en la profundidad de 20-30 cm donde hubo mayor deposición de amonio con  $0.015 \text{ Mg ha}^{-1}$ .

#### **3.5.4.2. Nitrato**

Se analizó el grado de respuesta por factor y se pudo observar la formación de dos grupos, destacando la cobertura oyamel y pino-aile con mayor concentración de amonio de  $31.80$  y  $24.48 \text{ mg kg}^{-1}$  respectivamente, referente a la pendiente del terreno y profundidad no se encontró diferencia alguna en su grado de respuesta en la concentración, de manera similar se comportó la interacción cobertura-profundidad, mientras que para cobertura-pendiente se conformaron tres grupos destacando el bosque de oyamel con pendiente de 10.10-21.16 la mejor con valores medios de  $35.35 \text{ mg kg}^{-1}$  (Cuadro 9).

Cuadro 9. Mejores tratamientos para la concentración y contenido de nitrato en el suelo del área de estudio.

	Factores		Cob*Pend		Cob*Prof		Pend*Prof		Cob*Pend*Prof	
Concentración Nitrato (mg kg <sup>-1</sup> )	O	31.807 a	O-2	35.356 a	O-P1	33.990 a	2-P1	30.494 a	O-2-P1	40.345 a
	PA	24.489 a	O-3	33.491 ba	O-P2	31.556 a	2-P3	29.292 ba	PA-2-P3	36.959 a
	P	22.182 b	PA-2	30.126 ba	O-P3	29.877 a	3-P2	26.317 ba	O-3-P2	34.580 a
	2	28.148 a	P-1	28.006 ba	PA-P3	25.914 a	3-P1	26.252 ba	O-3-P1	33.903 a
	3	25.917 a	O-1	26.575 ba	PA-P1	25.472 a	1-P2	25.591 ba	O-2-P2	33.422 a
	1	24.413 a	PA-3	24.684 ba	P-P3	22.974 a	3-P3	25.183 ba	O-2-P3	32.299 a
	P1	26.701 a	P-3	19.577 ba	P-P2	22.930 a	2-P2	24.660 b	P-1-P2	32.050 a
	P3	26.255 a	P-2	18.964 ba	PA-P2	22.082 a	1-P3	24.290 b	O-3-P3	31.990 a
	P2	25.523 a	PA-1	18.657 b	P-P1	20.642 a	1-P1	23.358 b	PA-2-P1	30.205 a
Contenido Nitrato (Mg ha <sup>-1</sup> )	O	0.01901 a	O-3	0.02078 a	O-P2	0.01943 a	2-P3	0.01927 a	PA-2-P3	0.02706 a
	PA	0.01498 a	O-2	0.02024 a	O-P1	0.01926 a	1-P2	0.01749 a	P-1-P2	0.02424 ba
	PA	0.01451 a	P-1	0.02002 a	O-P3	0.01833 a	3-P2	0.01647 a	O-3-P2	0.02225 bac
	2	0.01713 a	PA-2	0.01947 a	PA-P3	0.01737 a	2-P2	0.01613 a	O-2-P1	0.02203 bac
	1	0.01582 a	O-1	0.01602 a	P-P2	0.01607 a	2-P1	0.01599 a	O-3-P1	0.02025 bac
	3	0.01556 a	PA-3	0.01407 a	PA-P2	0.01459 a	1-P3	0.01565 a	O-3-P3	0.01984 bac
	P2	0.0167 a	P-3	0.01182 a	P-P3	0.01418 a	3-P1	0.01524 a	O-2-P2	0.01964 bac
	P3	0.01663 a	P-2	0.01168 a	P-P1	0.01327 a	3-P2	0.01495 a	O-2-P3	0.01904 bac
	P1	0.01518 a	PA-1	0.01141 a	PA-P1	0.013 a	1-P1	0.0143 a	P-1-P3	0.01902 bac

En cada columna, letras distintas indican diferencias significativas ( $p < 0.05$ ), entre tratamientos. Cob: coberturas (PA: Pino-aile, O: Oyamel, P: Pino), Pend: pendiente (1: 0-10.10, 2: 10.10-21.16, 3: 21.16-48.43 grados), Prof: profundidad (P1: 0-10, P2: 10-20, P3: 20-30 cm).

Los resultados para el nitrógeno asimilable expresado en contenido de nitrato evidenciaron que no existieron diferencias significativas en las medias de tratamientos cuando se analizó la respuesta por factor e interacción de dos factores, caso contrario para el análisis de tres factores con sus niveles, donde se formaron tres grupos, destacando la cobertura pino-aile bajo la pendiente de 10.10-21.16 en el rango de profundidad de 20-30 cm con 0.27 Mg ha<sup>-1</sup>.

### 3.5.5 Comparación de valores de las variables utilizando el promedio de muestras simples y muestras compuestas

Durante la comparación de los valores medios de las variables concentración y contenido de carbono, nitrógeno, amonio, nitrato y relación carbono/nitrógeno de cada una de las muestras simples y muestras compuestas (ver cuadro 10), se identificaron diferencias en el almacenamiento de estos nutrientes en el suelo, esto se debió particularmente a la localización de la muestras a una profundidad determinada y a la densidad aparente. Los valores puntuales de carbono, nitrógeno, amonio y nitrato cambiaron considerablemente al analizarse la información en muestras simples a muestras compuestas ya que se incrementaron las concentraciones y contenidos de estos elementos.

Cuadro 10. Concentración y contenido de carbono, nitrógeno total, amonio, nitratos y relación carbono/nitrógeno en las muestras compuestas de suelo.

No.	CO (%)	CO (Mg ha <sup>-1</sup> )	Nt (%)	Nt (Mg ha <sup>-1</sup> )	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>1)</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (Mg ha <sup>-1</sup> ) <sup>1)</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>1)</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (Mg ha <sup>-1</sup> ) <sup>1)</sup>	Rel C/N
1	5.69	123.59	0.52	11.28	22.3	0.0484	17.5	0.0380	11.0
2	7.83	146.66	0.54	10.11	24.1	0.0451	37.6	0.0704	14.5
3	5.88	104.35	0.36	6.38	16.7	0.0296	20	0.0355	16.4
4	12.08	223.54	0.99	18.31	20.4	0.0377	32.6	0.0603	12.2
5	11.31	228.16	0.88	17.75	16.7	0.0337	22.5	0.0454	12.9
6	9.36	129.61	0.86	11.91	24.1	0.0334	15	0.0208	10.9
7	10.52	175.93	0.98	16.38	20.4	0.0341	42.6	0.0712	10.7
8	12.67	198.71	0.96	15.05	26	0.0408	32.6	0.0511	13.2
9	12.28	220.97	1.05	18.89	20.4	0.0367	27.5	0.0495	11.7

Nota: Abreviaturas: 1 (Pino, 0-10.21), 2 (Pino, 10.21-21.33), 3 (Pino, 21.33-48.62), 4 (Pino-aile, 0-10.21), 5 (Pino-aile, 10.21-21.33), 6 (Pino-aile, 21.33-48.62), 7 (Oyamel, 0-10.21), 8 (Oyamel, 10.21-21.33), 9 (Oyamel, 21.33-48.62). Pendiente: 0-10.10, 10.10-21.16, y 21.16-48.43 grados. CO: carbono orgánico, Nt: nitrógeno total, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>: amonio, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>: nitrato.

Ya que para el factor cobertura en el muestreo simple las mejores áreas fueron el bosque de pino aile con  $87.91 \text{ Mg ha}^{-1}$  de carbono en el suelo y el bosque de oyamel con  $5.50 \text{ Mg ha}^{-1}$  para el caso de nitrógeno, mientras que en las muestras compuestas, el bosque de pino-aile con reservorios de  $228.16 \text{ Mg ha}^{-1}$  de carbono y  $18 \text{ Mg ha}^{-1}$  de nitrógeno en el suelo. La relación carbono/nitrógeno en las muestras compuestas presentó valores que oscilaron de 10.7-16.4, estos fueron cercanos a la proporción C/N que indican una buena mineralización y humificación de la MO (Quantin & Geissert, 1988), mientras que las muestras simples se registraron valores de 8.36 a 20.60. Para el caso del nitrógeno inorgánico en las formas de amonio y nitrato los valores se comportaron similares a carbono y nitrógeno, encontrándose valores mayores en las muestras compuestas.

### **3.6 CONCLUSIONES**

La cobertura vegetal cobro mayor relevancia que el factor pendiente, aunado a que en algunos de los tratamientos generados por la interacción de los factores cobertura, pendiente y profundidad, tal como la rugosidad del terreno y el tipo de bosque tuvieron mayor significancia en los valores encontrados; respecto a la profundidad del suelo la mayor concentración y contenido de nutrientes (carbono, nitrógeno total, amonio, nitratos) se encontraron en los primeros 10 cm y 20 cm, conforme aumentó la profundidad de muestreo, estos valores descendieron.

El tipo de muestra si incidió sobre los resultados obtenidos en el área de estudio. Por ejemplo para el contenido de COS en muestras simples la mejor fue el bosque pino-aile en zonas con pendientes de 10.10-21,16 en la tercera profundidad (20-30 cm) con  $118.92 \text{ Mg ha}^{-1}$ , mientras que para las muestras compuestas, de igual manera esta cobertura pino-aile en la misma clasificación de pendiente con  $228.16 \text{ Mg ha}^{-1}$ . Para nitrógeno total se tiene que el bosque de oyamel presento mayor contenido con  $14.37 \text{ Mg ha}^{-1}$  en muestras simples, mismo caso para las muestras compuestas la cobertura oyamel presento mayor contenido con  $18.89 \text{ Mg ha}^{-1}$ .

El mayor reservorio para carbono en el suelo de acuerdo al análisis de la interacción de los tres factores evaluados en la dinámica y movilización de este elemento en los primeros 30 cm fue el bosque de oyamel con  $114.01 \text{ Mg ha}^{-1}$ , mientras que para el contenido de nitrógeno total en el suelo fueron los sistemas oyamel y pino-aile con  $8.38 \text{ Mg ha}^{-1}$  y  $7.95 \text{ Mg ha}^{-1}$  respectivamente, cabe mencionar que dichos resultados variaron acorde a las condiciones de sitio reflejado en el manejo brindado a las áreas forestales y grado de intervención.

Con base en los resultados obtenidos e hipótesis planteadas, se cumple con los supuestos establecidos para esta investigación.

La Estación Experimental Forestal Zoquiapan, al formar parte y ser vecina del Área Natural Protegida Iztaccíhuatl-Popocatepetl, es de gran importancia en la regulación de cuencas hidrológicas ubicadas en la región, la conservación de esta zona podrá contribuir en la mitigación al cambio climático mediante la conservación, secuestro y almacenamiento de carbono y nitrógeno que inciden en la fertilidad del suelo, de acuerdo a los resultados obtenidos, son zonas potenciales para incursionar en proyectos de tipo ambiental.

### **3.7 AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a la Universidad Autónoma Chapingo, Especialmente el posgrado de la División de Ciencias Forestales, por haberme dado la oportunidad de realizar mis estudios de Maestría. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el financiamiento brindado para concluir mis estudios.

### **3.8. LITERATURA CITADA**

Aguilar V., B. y Plateros G. P. A. (2003), Monitoreo de Vegetación y Fauna en la Estación Forestal Experimental Zoquiapan. In: Memoria de la XIX Presentación de Trabajos de Investigación, Producción y Servicio de la Universidad Autónoma Chapingo. Dirección General de Investigación y Posgrado. Chapingo, México. pp: 111-125.

Anaya C.A., Mendoza M., Rivera M., Páez R. y Olivares M.L.D. (2016), Contenido de Carbono Orgánico y Retención de Agua en Suelos de un Bosque de Niebla en Michoacán, México, *Revista Agrociencia*: Vol 50, 251-269.

Almaraz Suárez, J., Gutiérrez Guzmán, B., Velázquez Martínez, A., y Etchevers Barra, J. D.; (2005). Influencia del aile (*Alnus firmifolia*) en el crecimiento de plantas de *Pinus patula*. *Terra Latinoamericana*, Enero-Marzo, 89-96.

Ávila, G.; F. Jiménez; J. Beer; M. Gómez y M. Ibrahim. (2001), Almacenamiento, fijación de carbono y valoración de servicios ambientales en sistemas agroforestales en Costa Rica. *Agroforestería de las Américas*, 8(30): 32-35.

Ávila H., Harmand J.M., Dambrine E., Jiménez F., Beer J. y Oliver R. (2004), Dinámica del nitrógeno en el sistema agroforestal *Coffea arabica* con *Eucalyptus deglupta* en la Zona Sur de Costa Rica, *Revista Agroforestería en las Américas*, Vol: 41: 83-91.

Barrera G., J.E. y Rivera P., J.H. (2011), Propiedades físicas de un andisol de la zona cafetera colombiana y su influencia sobre los deslizamientos. *Revista Cenicafé* 62(1):76-86.

Bastidas, A; (2000). Diagnóstico de fertilidad de suelos en pendientes inferiores a 25%. Boconó, estado Trujillo. *Geoenseñanza*, 5, 229-246. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=36050205>

Batjes, N. H. (1996), Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *Eur. J. Soil Sci.* 47: 151-163.

Castillo P.L.A., Bojórquez S.J.I, Hernández J.A. y García P.D., (2016), Contenidos de carbono orgánico en suelos bajo diferentes coberturas vegetales y de cultivo, *Cultivos tropicales*, Vol 37 (3): 72-78.

Celaya M.H., García O.F., Rodríguez C.J. y Castellano V., A.E. (2015), Cambios en el Almacenamiento de Nitrógeno y Agua en el Suelo de un Matorral Desértico Transformado a Sabana de Buffel (*Pennisetum ciliare* (L.) Link), *Revista Terra Latinoamericana*, Vol: 33: 79-93.

DOF, 2002, NOM-021-RECNAT-2000, Que estable las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis para México. Diario Oficial de la Federación, Diciembre 2002.

Franzmeier, D.P., G.D. Lemme y R.J. Miles. (1985), Organic carbon in soils of the North Central United States. Soil Sci. Soc. Am. J. 49: 702-708.

González Molina, L., Etchevers Barra, J. D., e Hidalgo Moreno, C. (2008). Carbono en suelos de ladera: factores que deben considerarse para determinar su cambio en el tiempo. *Agrociencia*, 42(7), 741-751. Recuperado el 25 de marzo de 2016, de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-31952008000700001&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952008000700001&lng=es&tlng=es).

Grigal, D.F. y L.F. Ohmann. (1992), Carbon storage in upland forests of the Lake States. Soil Sci. Soc. Am. J. 56: 935-943.

Herrera H., B. & Rodríguez B., D. (1975), Estudio integrado de los recursos físicos naturales del área de Zoquiapan. Bol. Inf. Tec. De Bosque. Universidad Autónoma Chapingo.

INEGI, 2013. Continúo de Elevaciones Mexicano 3.0, Recuperado de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/descarga.aspx> (consulta: 02/09/2015).

IPCC1997. IPCC Guidance for Green House Gas Inventories – Cuadernillo de Trabajo (Volumen 2) Actualizado en 1996. <http://www.ipcc.ch>

Matus, F. J., Maire G., y Christian R. (2000). Relación entre la materia orgánica del suelo, textura del suelo y tasas de mineralización de carbono y nitrógeno. *Agricultura Técnica*, 60(2), 112-126. <https://dx.doi.org/10.4067/S0365-28072000000200003>

Mohedano Caballero, L; Razo Zarate, R, y Capulín Grande, J. (2010). Cambios en el suelo y vegetación de un bosque de pino afectado por incendio. *Terra Latinoamericana*, 28() 79-87.

NADP (NATIONAL ATMOSPHERIC DEPOSITION PROGRAM), 2000, Centro Internacional para la Educación Química. El Nitrógeno en la Lluvia Nacional, E.U., <http://nadp.sws.uiuc.edu/lib/brochures/nbrochespanol.pdf>. (Consulta: Septiembre, 2016)

Obieta O., MC. (1977). Estructura y Composición de la Vegetación Herbácea de un Bosque Uniespecífico de *Pinus hartwegii*. Tesis Profesional, Facultad de ciencias de la UNAM, D.F. 85p.

Orellana-Rivadeneira G., Sandoval-Solís M.L., Linares-Fleites G., García-Calderon N.E. y Tamariz-Flores J.V. (2012), Descripción de la Dinámica de Carbono en Suelos Forestales mediante un Modelo de Reservorios, Revista Avances en Ciencias e Ingeniería: Vol 3(1), Enero/Marzo, 123-135

Orjuela Ch. J.A., Ramírez P.B.L. y Andrade C.H.J., (2010), Potencial de almacenamiento de carbono en áreas de regeneración natural de paisajes ganaderos de la Amazonia colombiana, Revista Facultad de Ciencias Agropecuarias. Vol: 2(1):60-72.

Pérez R. S., Ramírez M. I. Jaramillo L. P.F. y Bautista F. (2013), Contenido de Carbono Orgánico en el suelo bajo diferentes condiciones forestales: Reserva de la biosfera mariposa monarca, México, Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente, 19(1), 157-173.

Peris M.M.B. (2013), El suelo como sumidero de CO<sub>2</sub>: Mapa de retención de CO<sub>2</sub> de las tierras de labor de los distintos países de la Unión Europea. Revista de Medio Ambiente "Ojeando la Agenda". ISSN 1989-6794. Vol. 24, 27-16.

Quantin, P., & Geissert, D. (1988). Características químicas y mineralógicas de un andosol y de un suelo ferralítico de Xalapa, Veracruz, México. INIREB, ISBN 968-6280-16-2, 24 p.

Raymundo, Elías. (2008), "Parámetros de transporte de atrazina en un andosol y un vertisol de México". Tesis de Doctorado. Colegio de Postgraduados, México.

Rey C. J. (1975), Estudios de suelo de la Estación de Enseñanza Investigación y Servicios Forestales de Zoquiapan, Universidad Autónoma Chapingo, Información técnica de bosques, 64 p

Rivas Y., Oyarzún C., Godoy r., & Valenzuela E., (2009), Mineralización del nitrógeno, carbono y actividad enzimática del suelo en un bosque de *Nothofagus obliqua* (Mirb) Oerst y una plantación de *Pinus radiata* D.Don. del centro-sur de Chile, Revista Chilena de Historia Natural, Vol: 82: 119-134.

Ruiz L. A., (2012), Cambios de uso del suelo y su efecto en el contenido químico de M.O., C/N y C/P en el ejido “el conejo”, Perote, Veracruz, Tesis de licenciatura, Universidad Veracruzana.

Sánchez Guzmán, P; Gutiérrez-Castorena, M. C., Ortiz Solorio, C A y Segura-Castruita, M A, (2005), Carbono orgánico de los suelos de México. Terra Latinoamericana, 23, 21-28.

Valtera M., Samonil P., Svoboda M., y Janda P. (2015), Effects of topography and forest stand dynamics on soil morphology in three natural *Picea abies* mountain forest, Springer Plant soil, doi:10.1007/s11104-015-2442-4.

Vega Aviña Rito, (1982), Manual de la flora de la Estación Experimental de Enseñanza e Investigación y Servicios Forestales Zoquiapan, Tesis de Maestría en Ciencias, Colegio de Postgraduados, México.

Vela C., G; Rodríguez G. M. L; López B., J; (2012). Niveles de carbono orgánico total en el Suelo de Conservación del Distrito Federal, centro de México. Investigaciones Geográficas, UNAM, (77), 18-30.

Walkley, A., y Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil science, 37(1), 29-38.

## ANEXO

Anexo 1 Propiedades físicas y químicas de las unidades de muestreo del suelo, en la Estación Forestal Experimental Zoquiapan.

Cobertura	Pendiente (Grados)	Profundidad (cm)	Repetición	Dap g cm <sup>3</sup>	MO (%)	CO (%)	CO (Mg ha <sup>-1</sup> )	N Tot. (%)	N tot (Mg ha <sup>-1</sup> )	NH4 (%)	NH4 (Mg ha <sup>-1</sup> )	NO3 (%)	NO3 (Mg ha <sup>-1</sup> )	Rel C/N
Pino	0-10.10	0-10	1	0.7208	9.41	5.4582	39.3440	0.54	3.8924	0.0013	0.0094	0.0021	0.0150	10.1078
Pino	0-10.10	010-20	1	0.8170	7.93	4.5998	37.5796	0.51	4.1666	0.0019	0.0158	0.0039	0.0319	9.0192
Pino	0-10.10	20-30	1	0.7670	6.19	3.5905	27.5385	0.58	4.4485	0.0020	0.0156	0.0031	0.0239	6.1905
Pino	0-10.10	0-10	2	0.7206	6.72	3.8979	28.0866	0.54	3.8910	0.0020	0.0141	0.0023	0.0169	7.2184
Pino	0-10.10	010-20	2	0.6625	4.84	2.8074	18.5987	0.38	2.5174	0.0013	0.0086	0.0029	0.0189	7.3880
Pino	0-10.10	20-30	2	0.4918	5.17	2.9988	14.7493	0.44	2.1641	0.0019	0.0091	0.0031	0.0153	6.8155
Pino	0-10.10	0-10	3	0.7671	9.55	5.5394	42.4941	0.62	4.7561	0.0028	0.0213	0.0021	0.0160	8.9346
Pino	0-10.10	010-20	3	0.7985	6.05	3.5093	28.0206	0.54	4.3117	0.0019	0.0149	0.0023	0.0187	6.4987
Pino	0-10.10	20-30	3	0.7645	5.51	3.1961	24.4330	0.49	3.7459	0.0013	0.0099	0.0018	0.0139	6.5226
Pino	10.10-21.16	0-10	1	0.4107	25.55	14.8202	60.8730	0.64	2.6288	0.0030	0.0122	0.0018	0.0075	23.1565
Pino	10.10-21.16	010-20	1	0.6994	16.54	9.5940	67.0991	0.42	2.9374	0.0017	0.0117	0.0016	0.0109	22.8428
Pino	10.10-21.16	20-30	1	0.5356	13.31	7.7204	41.3521	0.82	4.3921	0.0022	0.0119	0.0013	0.0070	9.4151
Pino	10.10-21.16	0-10	2	0.5002	18.15	10.5278	52.6569	0.71	3.5512	0.0030	0.0149	0.0018	0.0091	14.8279
Pino	10.10-21.16	010-20	2	0.7950	12.77	7.4072	58.8894	0.69	5.4857	0.0019	0.0148	0.0014	0.0113	10.7351
Pino	10.10-21.16	20-30	2	0.7247	11.03	6.3979	46.3628	0.33	2.3914	0.0020	0.0148	0.0015	0.0109	19.3876
Pino	10.10-21.16	0-10	3	0.6680	17.75	10.2958	68.7799	0.6	4.0082	0.0022	0.0149	0.0013	0.0087	17.1597
Pino	10.10-21.16	010-20	3	0.6657	8.07	4.6810	31.1592	0.34	2.2632	0.0019	0.0124	0.0008	0.0052	13.7676
Pino	10.10-21.16	20-30	3	0.6158	6.19	3.5905	22.1097	0.28	1.7242	0.0020	0.0126	0.0012	0.0076	12.8232
Pino	21.16-48.43	0-10	1	0.7127	9.55	5.5394	39.4824	0.46	3.2786	0.0013	0.0093	0.0010	0.0074	12.0423

Pino	21.16-48.43	010-20	1	0.8125	6.19	3.5905	29.1724	0.43	3.4937	0.0017	0.0136	0.0011	0.0093	8.3500
Pino	21.16-48.43	20-30	1	0.6250	5.3	3.0742	19.2154	0.23	1.4376	0.0013	0.0081	0.0013	0.0081	13.3663
Pino	21.16-48.43	0-10	2	0.7531	15.6	9.0487	68.1456	0.5	3.7655	0.0019	0.0140	0.0010	0.0078	18.0974
Pino	21.16-48.43	010-20	2	0.2345	6.86	3.9791	9.3326	0.28	0.6567	0.0017	0.0039	0.0010	0.0024	14.2111
Pino	21.16-48.43	20-30	2	0.3589	5.18	3.0046	10.7833	0.38	1.3638	0.0020	0.0073	0.0013	0.0047	7.9069
Pino	21.16-48.43	0-10	3	0.5797	8.88	5.1508	29.8578	0.3	1.7390	0.0011	0.0064	0.0010	0.0060	17.1694
Pino	21.16-48.43	010-20	3	0.7019	5.24	3.0394	21.3339	0.33	2.3163	0.0013	0.0091	0.0013	0.0091	9.2104
Pino	21.16-48.43	20-30	3	0.5393	4.03	2.3376	12.6072	0.31	1.6719	0.0007	0.0040	0.0013	0.0072	7.5406
Pino-Aile	0-10.10	0-10	1	0.6126	21.39	12.4072	76.0077	1.14	6.9838	0.0011	0.0068	0.0008	0.0050	10.8835
Pino-Aile	0-10.10	010-20	1	0.6985	16.81	9.7506	68.1042	0.77	5.3782	0.0011	0.0075	0.0008	0.0054	12.6631
Pino-Aile	0-10.10	20-30	1	0.7572	15.46	8.9675	67.9018	0.9	6.8148	0.0011	0.0084	0.0008	0.0058	9.9639
Pino-Aile	0-10.10	0-10	2	0.3254	23.13	13.4165	43.6599	1.19	3.8725	0.0019	0.0061	0.0013	0.0042	11.2743
Pino-Aile	0-10.10	010-20	2	0.7108	22.19	12.8712	91.4842	1.29	9.1689	0.0011	0.0079	0.0006	0.0040	9.9777
Pino-Aile	0-10.10	20-30	2	0.6151	16.14	9.3619	57.5875	0.94	5.7822	0.0008	0.0047	0.0004	0.0023	9.9595
Pino-Aile	0-10.10	0-10	3	0.5343	23.13	13.4165	71.6839	0.84	4.4881	0.0024	0.0129	0.0005	0.0026	15.9720
Pino-Aile	0-10.10	010-20	3	0.7015	24.34	14.1183	99.0408	0.92	6.4538	0.0009	0.0065	0.0008	0.0055	15.3460
Pino-Aile	0-10.10	20-30	3	0.5929	17.48	10.1392	60.1154	0.96	5.6918	0.0011	0.0066	0.0010	0.0062	10.5617
Pino-Aile	10.10-21.16	0-10	1	0.4446	13.31	7.7204	34.3256	0.5	2.2230	0.0005	0.0023	0.0021	0.0092	15.4408
Pino-Aile	10.10-21.16	010-20	1	0.8944	20.04	11.6241	103.9635	0.94	8.4071	0.0007	0.0060	0.0016	0.0140	12.3661
Pino-Aile	10.10-21.16	20-30	1	0.8240	24.88	14.4316	118.9161	1.01	8.3224	0.0028	0.0229	0.0016	0.0129	14.2887
Pino-Aile	10.10-21.16	0-10	2	0.2442	24.88	14.4316	35.2415	1.18	2.8815	0.0035	0.0086	0.0021	0.0051	12.2301
Pino-Aile	10.10-21.16	010-20	2	0.8233	20.31	11.7807	96.9955	1.02	8.3981	0.0011	0.0091	0.0007	0.0059	11.5497
Pino-Aile	10.10-21.16	20-30	2	0.6793	16.54	9.5940	65.1701	0.84	5.7060	0.0013	0.0088	0.0010	0.0071	11.4214
Pino-Aile	10.10-21.16	0-10	3	0.5343	12.05	6.9896	37.3450	0.87	4.6484	0.0026	0.0139	0.0008	0.0042	8.0340
Pino-Aile	10.10-21.16	010-20	3	0.7844	14.54	8.4339	66.1593	0.9	7.0600	0.0011	0.0087	0.0005	0.0036	9.3710

Pino-Aile	10.10-21.16	20-30	3	0.8235	11.97	6.9432	57.1749	0.66	5.4349	0.0017	0.0138	0.0042	0.0343	10.5199
Pino-Aile	21.16-48.43	0-10	1	0.3320	17.21	9.9826	33.1457	1.04	3.4532	0.0013	0.0043	0.0016	0.0052	9.5987
Pino-Aile	21.16-48.43	010-20	1	0.6356	15.87	9.2053	58.5117	0.68	4.3223	0.0009	0.0059	0.0015	0.0092	13.5373
Pino-Aile	21.16-48.43	20-30	1	0.5057	13.04	7.5638	38.2520	0.69	3.4895	0.0007	0.0037	0.0004	0.0018	10.9620
Pino-Aile	21.16-48.43	0-10	2	0.4441	12.77	7.4072	32.8938	0.78	3.4638	0.0020	0.0091	0.0004	0.0019	9.4964
Pino-Aile	21.16-48.43	010-20	2	0.5527	8.74	5.0696	28.0190	0.49	2.7082	0.0015	0.0082	0.0004	0.0023	10.3461
Pino-Aile	21.16-48.43	20-30	2	0.5305	9.28	5.3828	28.5538	0.55	2.9175	0.0019	0.0099	0.0005	0.0028	9.7870
Pino-Aile	21.16-48.43	0-10	3	0.2351	40.32	23.3875	54.9769	2.05	4.8189	0.0011	0.0026	0.0010	0.0024	11.4085
Pino-Aile	21.16-48.43	010-20	3	0.4873	14.41	8.3585	40.7339	0.89	4.3373	0.0007	0.0036	0.0005	0.0023	9.3915
Pino-Aile	21.16-48.43	20-30	3	0.4306	8.07	4.6810	20.1556	0.54	2.3252	0.0020	0.0088	0.0005	0.0022	8.6685
Oyamel	0-10.10	0-10	1	0.4665	18.83	10.9223	50.9526	0.91	4.2452	0.0019	0.0087	0.0008	0.0036	12.0025
Oyamel	0-10.10	010-20	1	0.5434	16.14	9.3619	50.8752	0.87	4.7278	0.0009	0.0051	0.0007	0.0037	10.7609
Oyamel	0-10.10	20-30	1	0.6249	13.72	7.9582	49.7320	0.81	5.0618	0.0010	0.0060	0.0005	0.0032	9.8250
Oyamel	0-10.10	0-10	2	0.5586	17.35	10.0638	56.2202	0.97	5.4188	0.0011	0.0062	0.0008	0.0044	10.3751
Oyamel	0-10.10	010-20	2	0.5732	16.54	9.5940	54.9916	0.94	5.3880	0.0007	0.0042	0.0007	0.0041	10.2063
Oyamel	0-10.10	20-30	2	0.8120	11.97	6.9432	56.3759	0.8	6.4957	0.0005	0.0040	0.0005	0.0042	8.6789
Oyamel	0-10.10	0-10	3	0.1597	15.39	8.9269	14.2534	1.48	2.3631	0.0020	0.0033	0.0008	0.0012	6.0317
Oyamel	0-10.10	010-20	3	0.6698	19.36	11.2297	75.2117	1.14	7.6352	0.0015	0.0099	0.0005	0.0035	9.8506
Oyamel	0-10.10	20-30	3	0.6057	16.94	9.8260	59.5191	0.93	5.6333	0.0007	0.0045	0.0004	0.0023	10.5656
Oyamel	10.10-21.16	0-10	1	0.4270	21.52	12.4826	53.3025	1.31	5.5939	0.0039	0.0167	0.0031	0.0133	9.5287
Oyamel	10.10-21.16	010-20	1	0.7217	15.46	8.9675	64.7226	1.04	7.5061	0.0019	0.0134	0.0010	0.0075	8.6226
Oyamel	10.10-21.16	20-30	1	0.5119	14.41	8.3585	42.7905	0.84	4.3003	0.0013	0.0067	0.0016	0.0080	9.9506
Oyamel	10.10-21.16	0-10	2	0.8716	16.81	9.7506	84.9883	0.93	8.1061	0.0019	0.0162	0.0008	0.0068	10.4845
Oyamel	10.10-21.16	010-20	2	0.6260	14.52	8.4223	52.7210	0.95	5.9467	0.0011	0.0069	0.0004	0.0026	8.8656
Oyamel	10.10-21.16	20-30	2	0.6174	14.66	8.5035	52.4981	0.92	5.6798	0.0007	0.0046	0.0004	0.0022	9.2429

Oyamel	10.10-21.16	0-10	3	0.2213	18.15	10.5278	23.2994	1.02	2.2574	0.0013	0.0029	0.0013	0.0029	10.3214
Oyamel	10.10-21.16	010-20	3	0.3232	18.56	10.7657	34.7915	0.92	2.9732	0.0007	0.0024	0.0016	0.0050	11.7018
Oyamel	10.10-21.16	20-30	3	0.3839	12.77	7.4072	28.4355	0.67	2.5721	0.0007	0.0028	0.0007	0.0025	11.0555
Oyamel	21.16-48.43	0-10	1	0.2921	26.89	15.5974	45.5577	1.45	4.2352	0.0020	0.0060	0.0008	0.0023	10.7569
Oyamel	21.16-48.43	010-20	1	0.7638	13.45	7.8016	59.5897	0.76	5.8050	0.0011	0.0085	0.0010	0.0079	10.2653
Oyamel	21.16-48.43	20-30	1	0.4220	6.72	3.8979	16.4487	0.47	1.9833	0.0009	0.0039	0.0005	0.0022	8.2934
Oyamel	21.16-48.43	0-10	2	0.4991	23.53	13.6485	68.1210	1.31	6.5383	0.0008	0.0038	0.0008	0.0039	10.4187
Oyamel	21.16-48.43	010-20	2	0.6458	14.37	8.3353	53.8303	0.88	5.6832	0.0007	0.0048	0.0004	0.0023	9.4719
Oyamel	21.16-48.43	20-30	2	0.6622	14.52	8.4223	55.7737	0.73	4.8342	0.0006	0.0037	0.0005	0.0034	11.5374
Oyamel	21.16-48.43	0-10	3	0.7297	25.55	14.8202	108.1402	1.97	14.3747	0.0032	0.0230	0.0008	0.0057	7.5229
Oyamel	21.16-48.43	010-20	3	0.6680	12.77	7.4072	49.4828	1.09	7.2816	0.0022	0.0149	0.0010	0.0069	6.7956
Oyamel	21.16-48.43	20-30	3	0.7135	10.4	6.0325	43.0444	0.83	5.9224	0.0011	0.0079	0.0005	0.0037	7.2681

---