



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

LA RELACIÓN CARBONO-NITRÓGENO EN EL
MANTILLO Y SUELO DEL BOSQUE DE *Abies*
Religiosa EN LA CUENCA DEL RÍO MAGDALENA,
D.F., MÉXICO.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

B I Ó L O G A

P R E S E N T A:

DIANA JEANNE FACIO LÓPEZ



DIRECTOR DE TESIS:
DR. FRANCISCO JAVIER ÁLVAREZ SÁNCHEZ

2015

Hoja de datos del jurado

1. Datos del alumno

Facio

López

Diana Jeanne

54296667

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ciencias

Biología

306109870

2. Datos del tutor

Dr.

Francisco Javier

Álvarez

Sánchez

3. Datos del sinodal 1

Dra.

María Guadalupe

Barajas

Guzmán

4. Datos del sinodal 2

Dra.

Silke

Cram

Heydrich

5. Datos del sinodal 3

Dr.

Enrique Arturo

Cantoral

Uriza

6. Datos del sinodal 4

M. en C.

Manuel

Hernández

Quiroz

7. Datos del trabajo escrito

La relación Carbono-Nitrógeno en el mantillo y suelo del bosque de *Abies religiosa* en la cuenca del Río Magdalena, D.F., México.

78p.

2015

Agradecimientos

A la UNAM por aceptarme tantos años en sus instalaciones proveyéndome de tantas satisfacciones en mi vida. Por el orgullo que siento de ser parte de tu comunidad.

A la Facultad de Ciencias, por hacerme ver la vida de una manera político- social para mí antes desconocida.

A la Licenciatura en Biología, por lograr que encontrara mi pasión en la vida.

Al Laboratorio de Ecología del Suelo, porque en el encontré un aspecto de la vida fascinante, por el apoyo de los académicos, las reuniones, comodidad, en fin momentos agradables.

Al programa de Investigación en Cambio Climático por el financiamiento de éste trabajo, a través del proyecto "La cuenca del río Magdalena, D. F. como sitio de referencia para el monitoreo de los efectos del cambio climático (PINCC)".

Dr. Javier Álvarez Sánchez por sus comentarios para que éste proyecto fuera lo que es, por el apoyo, confianza, tiempo, seguridad y paciencia otorgados.

M. en C. Manuel Hernández Quiroz por tantos momentos; el apoyo, tiempo, confianza, diversión, regañones, pláticas y consejos que lograron hacer la parte práctica de éste proyecto muy interesante.

Dras. Guadalupe Barajas y Silke Cram por que las admiro, por el apoyo y tantos valiosos consejos para mejorar éste trabajo.

A los revisores de éste trabajo para que finalmente fuera lo que es, muchas gracias Dra. Guadalupe Barajas, Dra. Silke Cram, Dr. Javier Álvarez, Dr. Enrique Cantoral y M. en C. Manuel Hernández.

Dra. Lucy Mora por la confianza que depósito en mí y el apoyo que recibí en el procesamiento de mis muestras.

Al COLPOS, por su recibimiento y apoyo con el procesamiento de mis muestras, en especial a la M. en C. Juliana Padilla y el Dr. Etchevers, por el gusto de conocerlo.

A Sabina León que me apoyó en la colección de muestras utilizadas en éste trabajo, además de acompañarnos esos días fríos llenos de tierra y risas.

A los académicos de Laboratorio de Ecología del Suelo por su ayuda y valiosos comentarios para enriquecer éste proyecto: gracias Dra. Irene Sánchez y M. en C. Juan Carlos Peña.

A Sofia Islas, Karen Maya y Tamara Mendoza por las sugerencias y opiniones para mejorar éste trabajo.

Al equipo de la CRM por la compañía durante esas salidas de campo.

Dedicatorias

A la vida, por permitirme estar aquí disfrutando tantos momentos de felicidad.

A la naturaleza, por hacerme sentir tan parte de ella y permitirme encontrar mi vocación.

A mí, por la realización de este proyecto, un logro más, por tantas desveladas y búsquedas.

A mis hermanos Gemma y Jesús, mis mayores amores en la vida, gracias por admirarme, su cariño me hace siempre ser una mejor versión de mi misma. A pesar de que ustedes sean la parte más inconsciente de mi pequeño cosmos, los amo con todas mis fuerzas.

A mi hija Andrea por ser mi musa inspiradora en ser mejor persona, para enseñarte y ofrecerte lo mejor. Gracias por todo lo que tú me enseñas día a día, te amo.

A mi mamá Norma por el esfuerzo de sacarme adelante sin escatimar e incentivarme a terminar este proyecto, te amo. A mi mamá, María Ana, mi otra mamá por cuidarme y hacer que sea la persona que ahora soy, por tanto amor incondicional y desenfrenado en mi vida porque sé que cualquier adversidad es más fácil gracias a ti.

A mi papá, Raúl porque sin su apoyo económico estos años de licenciatura habrían sido de otro proyecto, te quiero.

A mi mejor amiga, Sofia, por tanto cariño, porque siempre puedo contar contigo, éste proyecto fue llevadero gracias a tu compañía, tantas risas, tanta confianza, también regaños e historias juntas.

A mi hermana, por elección Tamara por ser mi amiga más realista, gracias por hacerme ver y pensar tantas cosas, sin tu amistad y buen humor, éste proyecto no habría sido lo mismo. Porque para mí tu cariño y protección es invaluable.

A Karen, esa amiga tan competitiva, gracias por tantas horas de secretos, pláticas especiales y sonrisas. Porque son tantas cosas que solo tú y yo comprendemos y nos hacen ser una misma, te quiero.

A Eduardo, ese amigo que trajo consigo lindos momentos, porque eres el parte aguas de una importante parte de mi vida, te quiero.

A mi ahijado Aarón, por quererme tanto.

A mi sobrino Sebastián, por la ilusión de conocernos.

A Cristian por su apoyo al cuidado de nuestra hija, el tiempo juntos y tanto apoyo económico.

A mis primas que tanto quiero, por los buenos momentos juntas. Gracias Selene Coraza mi princesita, Rosita Nieto mi niña y Andrea Cruz mi güera, por tantos momentos divertidos y difíciles, pero siempre juntas.

A mis tíos Ana Carranza y José Coraza, por apoyarme en esos momentos difíciles que acontecieron durante estos años y por siempre estar presentes, los quiero mucho.

No existe la libertad, sino la búsqueda de la libertad, y esa búsqueda es la que nos hace libres.

Carlos Fuentes

Índice

Resumen.....	1
1) Introducción.....	2
a. Ciclo del carbono (C).....	5
b. Ciclo del nitrógeno (N).....	7
c. Dinámica del Carbono en suelo.....	8
d. Dinámica del Nitrógeno en suelo.....	9
e. Relación C / N.....	10
f. Materia orgánica del suelo.....	11
g. Factores que regulan el almacenaje.....	12
h. Cambios en el estrato arbóreo.....	13
2) Antecedentes.....	15
3) Justificación.....	17
4) Objetivos.....	17
5) Hipótesis.....	18
6) Zona de estudio.....	19
a. Ubicación geográfica.....	19
b. Clima y suelo.....	19
c. Vegetación	20
d. Bosque de <i>Abies religiosa</i>	20
7) Métodos.....	21
a. Muestreo de Campo.....	21
b. Análisis de variables.....	27

8) Análisis de resultados.....	33
9) Resultados.....	36
10) Discusión.....	44
11) Conclusiones.....	50
12) Literatura citada.....	52

Lista de figuras

1. Almacenes y flujo de nutrientes en los ecosistemas.....	6
2. Principales rutas de nutrientes en suelo.....	9
3. Cambio de uso del suelo en el bosque de <i>Abies religiosa</i> , Cuenca del río Magdalena (CRM).....	14
4. Ubicación de la Cuenca del Río Magdalena.....	19
5. Distribución de los sitios de muestreo en el bosque de <i>Abies religiosa</i>	21
6. Sitio de muestreo con mayor cobertura de árboles.....	22
7. Sitio de muestreo 3.....	22
8. Sitio de muestreo 2.....	23
9. Sitio de muestreo 1.....	23
10. Sitio de muestreo 5.....	24
11. Sitio de muestreo 4.....	24
12. Representación de la parcela y la toma de muestras.....	26
13. Enterrado y extracción de cilindro.....	27
14. Recolección de muestra de mantillo.....	27
15. Tamizado de muestra de suelo.....	28
16. Sobres etiquetados con muestras de suelo.....	29
17. Determinación de la Densidad real.....	31
18. Pulverización de muestras de mantillo.....	32
19. a) Promedio de nitrógeno total en suelo para lluvias. b) Promedio de nitrógeno en suelo para secas.....	36
20. a) Promedio de la concentración de Carbono total en suelo para lluvias. b) Promedio de carbono total del suelo para secas.....	37
21. a) Promedio relación C/N del suelo en temporada lluviosa. b) Promedio de C/N en suelo para secas.....	38
22. a) Promedio nitrógeno total en mantillo para lluvias. b) Promedio de nitrógeno del mantillo en temporada de secas.....	39
23. a) Promedio carbono total en mantillo para lluvias. b) Promedio del Carbono total en mantillo para secas.....	40
24. a) Promedio relación C/N del mantillo en lluvias. b) Promedio de la relación C/N en mantillo de secas.....	41

Lista de tablas

1. Muestra los antecedentes de modelos que determinan la concentración de C en suelo.....15
2. Antecedentes respecto a cambio de uso de suelo.....15
3. Concentración, disponibilidad y movimiento de nutrientes del suelo en tres tipos de bosque mexicanos.....16
4. Propiedades físico-químicas de cada sitio de estudio.....25
5. Carbono total y Nitrógeno total para el almacén suelo. Los primeros datos son de temporada de lluvias siguiéndolos los de la de secas en la segunda fila.....42
6. Muestra la concentración de nutrientes para el mantillo. Los primeros datos son de temporada de lluvias siguiéndolos los de la de secas en la segunda fila.....43

Resumen

El cambio de uso de suelo plantea interrogantes vinculadas a la pérdida de biodiversidad, cambios en el ciclo de los nutrientes y modificaciones en las propiedades físicas y químicas del suelo. En la Cuenca del Río Magdalena, México, D.F., predomina el bosque de *Abies religiosa* que almacena la mayor cantidad de carbono en el suelo.

El objetivo de este trabajo fue estimar la relación C/N del mantillo y del suelo dentro del bosque de *Abies religiosa*, así como realizar una estimación del almacenamiento del carbono en el mantillo y en el suelo de la cuenca del Río Magdalena en época de lluvias y secas.

Se establecieron seis parcelas de 25 x 25 m, con diferencias en cuanto al área basal. Se tomó la cantidad de mantillo presente en un cuadro de 25 x 25 cm para determinar Ct y Nt, mientras que por otro lado, se recolectó el suelo en un cilindro de 100 cm³ para determinar densidad aparente y real, y los primeros diez centímetros de suelo para determinar textura, color, potencial de hidrógeno (pH), conductividad, Ct y Nt.

Con respecto a la relación C/N para suelo en secas, obtuve que existen diferencias significativas ($p < 0.05$) entre sitios, siendo el sitio con ausencia de árboles quien presenta los valores más bajos. Con respecto al almacén de carbono en el suelo para la temporada lluviosa, los valores más altos fueron para el sitio con área basal de 2.4 m² (113.84 Mg ha⁻¹) y en cuanto a N para el de 1.7 m² (3.85 Mg ha⁻¹); para la temporada de secas el mayor porcentaje de C y N lo presento el sitio sin área basal (4.92 y 3.26 Mg ha⁻¹, respectivamente). Para el mantillo en lluvias la mayor concentración de C fue en el sitio con área basal de 2.4 m² (0.54%). Para el caso del N, el valor más alto en lluvias fue de 2.07% (sitio 1.7 m²), mientras que en la temporada de secas fue de 1.72% en el sitio con 1.8 m² de área basal.

Los sitios con mayor área basal arbórea, aportan mayor cantidad de hojarasca, de tal manera que las proporciones C/N son más altas en el mantillo y en el suelo durante lluvias, debido a la descomposición. La proporción C/N para éste sitio de estudio entran dentro de los valores altos para bosques templados en el mundo.

Palabras clave: *Abies religiosa*, mantillo, suelo, carbono, nitrógeno, relación C/N.

Introducción

El carbono es la unidad principal de la vida del planeta y su ciclo es fundamental para el desarrollo de todos los organismos (Bolin y Sukumar, 2000). El carbono se almacena en compartimientos llamados almacenes o acervos y circula activamente entre ellos; de estos acervos, los océanos, son los que almacenan mayor cantidad con 38,000 Giga toneladas (Gt = mil millones de toneladas), seguido por el suelo (1,500 Gt) y la atmósfera (750 Gt) (Robert, 2001). La FAO (2010) calcula que los bosques del mundo almacenan aproximadamente 289 Gt de carbono solo en su biomasa. Cualquier desequilibrio entre los flujos de entrada y salida se refleja en la concentración del CO₂ atmosférico.

Los principales almacenes de C en los ecosistemas forestales se dividen en cuatro componentes (Janish y Harmon, 2002; Law, *et al.*, 2003):

- i) Carbono fijado, transformado en biomasa forestal.
- ii) El carbono orgánico del suelo en forma de materia orgánica total que puede dividirse en dos partes. La primera constituye el proceso llamado mineralización, donde los restos orgánicos son degradados hasta dejar en la solución del suelo, los elementos que eran constitutivos de las estructuras o moléculas orgánicas. El segundo proceso son las llamadas sustancias húmicas, cuya formación se realiza a partir de complicadas transformaciones de los restos vegetales y animales del primer grupo. El término es aplicado a compuestos que se forman en el suelo, mediante procesos donde no intervienen seres vivos (Kumada, 1987). En éste último proceso llamado humificación, se producen sustancias húmicas, que son una mezcla de polímeros formados a partir de los compuestos producidos por la acción microbiana. Difieren de estos biopolímeros por su estructura molecular y su larga persistencia en el tiempo, poseen una elevada resistencia al posterior ataque microbiano y son completamente diferentes en composición química, a cualquiera de las sustancias vegetales o animales de donde provienen (Mäser, 2006).
- iii) La fijación de carbono por acción de las bacterias autótrofas es otra manera de capturar el CO₂ de la atmósfera, aunque cuantitativamente menos importante que la fijación de las plantas.

- iv) La descomposición de la materia orgánica por microorganismos libera CO_2 que, al mezclarse con agua en el suelo forma ácido carbónico débil (H_2CO_3). El suelo forestal en zonas con caliza cerca de la superficie son alcalinos por el carbonato de calcio presente en la piedra caliza en constante mezcla con el suelo.

Globalmente los suelos a un metro de profundidad contienen 1500 Gt (1 Gigatonelada de Carbono equivale a 1×10^6 g) de carbono orgánico, de las que se estima que el 44% está localizado en los suelos de los trópicos, los cuales a su vez poseen los menores tiempos de residencia de la materia orgánica debido a que la temperatura y precipitación son más altas, lo que hace que los depósitos de carbono respondan con mayor rapidez a cambios ambientales como la sustitución de usos y de la cobertura vegetal del terreno (López *et al.*, 2005).

Los depósitos de carbono orgánico en el suelo representan un equilibrio dinámico de pérdidas y ganancias que son afectados por procesos erosivos, oxidación, humificación y escorrentía, razón por la cual el secuestro de carbono ocurre principalmente en aquellos sistemas que aportan altas cantidades de biomasa, mejoran la estructura del suelo, aumentan la actividad y la diversidad de fauna edáfica y propician mecanismos de ciclaje (Lal, 2004).

Factores que pueden modificar el secuestro de Carbono en el suelo son: el material parental que determina la composición mineral y química del suelo, la consolidación del material, la resistencia al intemperismo, la liberación de elementos y la geomorfología. Estas características con el tiempo se asocian con la textura, profundidad, densidad aparente, drenaje y grado de erodabilidad (Fisher, 2000; Lal, 2005; Robert, 2001). Además de factores limitantes como la producción primaria neta, la composición del bosque y el clima (temperatura y humedad) y, factores reductores como erosión, deforestación y uso del suelo, pueden disminuir la acumulación de carbono en el suelo (Fisher, 2000).

Los bosques contienen grandes cantidades de C almacenado en biomasa viva, muerta y en el suelo (Ordóñez y Masera, 2001). Sin embargo, en regiones tropicales y templadas hay un proceso acelerado de conversión de ecosistemas forestales con alta cantidad de biomasa a ecosistemas con vegetación secundaria, áreas cultivadas y pastizales (FAO, 1993). Actividades humanas, tales como los procesos derivados del cambio de uso de suelo y silvicultura, generan altas emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) como son bióxido de carbono, clorofluorocarburos, óxidos de nitrógeno y metano, principalmente (Colqué y Sánchez, 2007). Las estimaciones del total del bióxido de carbono emitido a partir

de estas reducciones en biomasa y procesos de deforestación varían entre 8 y 44% del total de emisiones antropogénicas de CO₂ (Cook, *et al.*, 1990; Schimel, 1995).

La capacidad de los ecosistemas forestales para almacenar C en forma de biomasa varía en función de la composición florística, la edad y la densidad de población de cada estrato por cada comunidad vegetal (Schulze, *et al.*, 2000). La determinación de esta capacidad constituye un reto cuando se trata de evaluar el potencial de sistemas forestales, naturales, alterados o inducidos por el hombre. Si bien en México existen algunos trabajos sobre secuestro de C en diferentes ecosistemas (Olguín, 2001), en los ecosistemas boscosos la residencia en el suelo es un tema poco estudiado.

Ciclo del Carbono

El ciclo del Carbono es principalmente de forma gaseosa (CO_2), y comienza con su asimilación a través de la fotosíntesis de las plantas y vuelve a la atmósfera con la respiración y la combustión (Kass, 1998). Más de la mitad del carbono asimilado por las plantas llega a la parte subterránea por medio del crecimiento, el movimiento y los exudados de las raíces de las plantas, además de la descomposición de hojarasca (Montagnini y Fair, 2004). El bióxido de carbono es transportado a los sitios donde se lleva a cabo la fotosíntesis y cierta cantidad de este CO_2 regresa a la atmósfera; la cantidad que se fija y se convierte en carbohidratos durante la fotosíntesis se conoce como producción primaria bruta (PPB) (FAO, 1985).

La FAO analizó la PPB, la cual se ha estimado globalmente en 120 PgC/año (1 Picogramo equivale a 1×10^{15} g). La mitad de la PPB (60 PgC/año) se incorpora en los tejidos vegetales, como hojas, raíces y tejido leñoso, y la otra mitad regresa a la atmósfera como CO_2 debido a la respiración autotrófica (respiración de los tejidos vegetales). El crecimiento anual de las plantas es el resultado de la diferencia entre el carbono fijado y el respirado; se le conoce como producción primaria neta (PPN) y a nivel global se ha estimado en 60 PgC/año. Eventualmente, en el transcurso del tiempo, casi todo el C fijado por vía de la PPN regresa a la atmósfera por medio de dos procesos: la respiración heterótrofa (Rh), que incluye a los desintegradores de la materia orgánica (bacterias y hongos que se alimentan de tejidos muertos y de exudados) y a los herbívoros, y por la combustión en los fuegos naturales o antropogénicos (FAO, 2002).

Gran parte de la biomasa muerta se incorpora al detritus y a la materia orgánica del suelo, donde es asimilada a diferentes velocidades dependiendo de sus características químicas (Figura 1). Se producen así almacenes de C en el suelo que lo regresan a la atmósfera en diferentes periodos. La diferencia entre la fijación de C por la PPN y las pérdidas por la Rh, en ausencia de otras perturbaciones que producen pérdidas de carbono, se conoce como la producción neta del ecosistema (PNE). Cuando todas las pérdidas de C se contabilizan, tales como el fuego, la cosecha o la remoción, el transporte por los ríos a los océanos y la erosión, lo que queda es el C que acumula efectivamente la biosfera a nivel global y que se conoce como la producción neta del bioma (PNB) (FAO, 2002).

El C incorporado por las plantas después del balance entre la PPB y la respiración, se transforma en moléculas móviles que se asignan a diferentes partes de la planta para

satisfacer sus necesidades fisiológicas y estructurales. Esta asignación va a determinar las rutas por las cuales se dará posteriormente el flujo de C al suelo y que eventualmente origina la MO (Chapin, *et al.*, 2002). Las plantas transfieren C al suelo por diferentes vías, las más importantes son la hojarasca, los exudados y la transferencia de alimento para organismos simbióticos en raíces.

El carbono orgánico del suelo representa la mayor reserva en interacción con la atmósfera y se estima en cerca de 1 500 Pg C a 1 m de profundidad (cerca de 2456 a dos metros de profundidad). El carbono inorgánico representa cerca de 1700 Pg pero es capturado en formas más estables tales como el carbonato de calcio (FAO, 2005).

Por tanto, son diferentes los tiempos de circulación del C entre los componentes del proceso. El C fijado por la fotosíntesis, emitido por la fotorespiración y la respiración circula en escalas de tiempo de segundos a horas; el que forma las hojas y raíces es sustituido en lapsos que van de semanas a años y el que forma parte de la madera es remplazado en periodos de décadas a siglos.

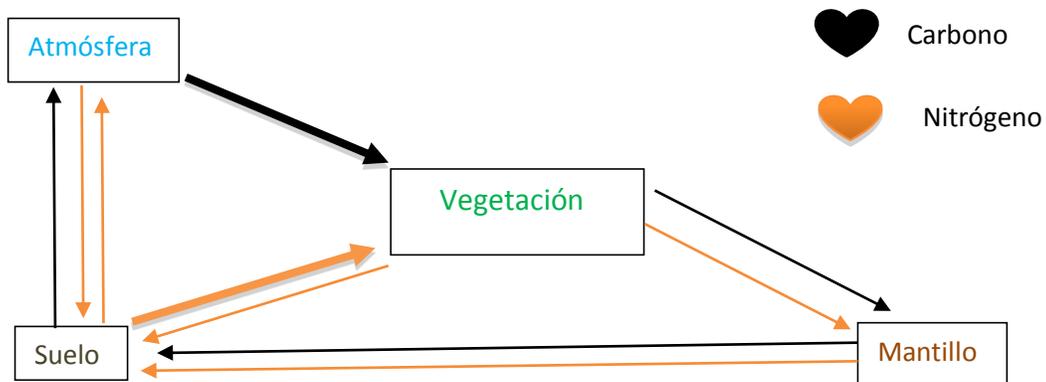


Figura 1. Almacenes y flujos de nutrientes en los ecosistemas (tomado parcialmente de Murray, 2011). Los rectángulos representan almacenes, el grosor de las flechas representa la intensidad del flujo.

Ciclo del Nitrógeno

El nitrógeno es un elemento esencial para la vida, que se encuentra en concentraciones muy bajas en los ecosistemas naturales, sin embargo este elemento es muy abundante en la atmósfera donde constituye el 78% de los gases que la componen (Montaño, 2008). A pesar de su abundancia, el nitrógeno atmosférico es una molécula gaseosa de dos átomos que no asimilan directamente la mayoría de los organismos eucariotas (Philippot y Germon, 2005). Para que las plantas lo absorban es necesario que se encuentre en el suelo en forma de iones de nitrato o de amonio. La habilidad de algunos sistemas para retener nitrógeno atmosférico se asocia con el tipo de vegetación, el estado sucesional, la historia del uso del suelo, la topografía y las condiciones edáficas (Small y McCarthy, 2005).

Cerca del 99% de nitrógeno combinado en el suelo se halla contenido en la materia orgánica. La materia orgánica se presenta, principalmente, en partículas parcialmente humificadas o en los componentes del humus, asociados a los minerales de arcilla (Swift y Posner, 1972). Tanto el contenido en humus, como su riqueza en nitrógeno son mayores en las partículas de menor tamaño.

A nivel mundial, se estima que la concentración total de N en el suelo en el primer metro de profundidad varía, en general de 0.02 a 0.07 % y de este entre 90 y 95% del N total del suelo se encuentra asociado con la MOS (Smith, 2003). La concentración de N en el humus varía de 3-6% (Whitmore y Handayanto, 1997) y menos de 1% del N total se encuentra en formas inorgánicas (Smith, 1994).

La disponibilidad de N en el suelo está en gran parte determinada por la actividad de los microorganismos, la cual depende tanto de la disponibilidad de agua como de energía (Atlas y Bartha, 2002). El nitrógeno contenido en los organismos de la biomasa microbiana cada año varía de 35 a 350 kg N/ha y en muchos suelos la mayoría del N disponible para las plantas corresponde a estos flujos (Duxbury, *et al.*, 1989).

Dinámica del Carbono en suelo

El Carbono en el suelo se encuentra en formas inorgánicas y orgánicas. En los suelos forestales, el C inorgánico se encuentra en muy bajas concentraciones y la mayoría se encuentra de forma orgánica (Noble, *et al.*, 2000). El suelo contiene en promedio 5% de MO; de éste se asume que el 58% corresponde a C (Stevenson y Cole, 1999).

La fracción de Carbono orgánico en el suelo (COS) está presente en diversas formas como son la fracción ligera y biomasa microbiana, que son formas lábiles de C y en ellas se encuentra la mayor concentración de carbono reciclable dentro del sistema a escalas de meses a años. Entre las transformaciones que se realiza del C orgánico está la mineralización del Carbono, resultando CO_2 , la formación de compuestos orgánicos más simples y aprovechables por otras poblaciones microbianas y la producción de biomasa. La última forma de estar presente es como fracción húmica que constituye cerca del 95% del COS y es la fracción químicamente más estable (Figura 2) (Oliva y García- Oliva, 1998).

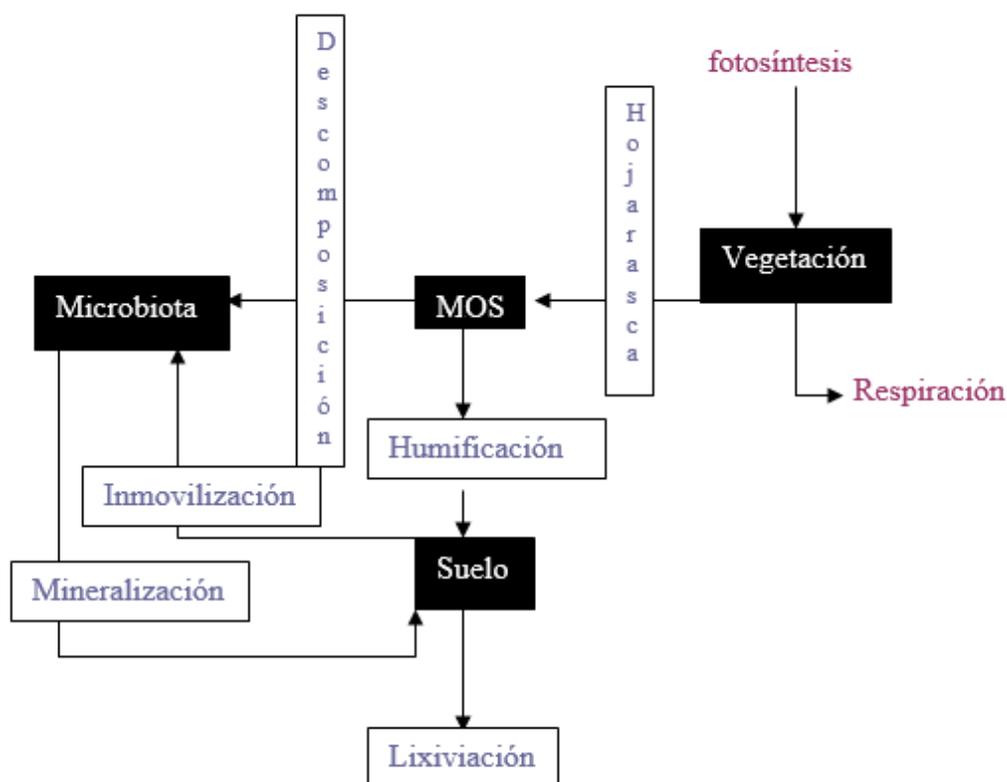


Figura 2. Principales rutas de nutrientes en el suelo. Letras en azul en recuadros representan procesos; los recuadros negros son almacenes (Tomado parcialmente de Aviña, 2007).

Dinámica del Nitrógeno en el suelo

Del total del N que hay en el suelo, aproximadamente el 98% se encuentra formando compuestos orgánicos. Dependiendo de su contenido de materia orgánica, los primeros 20 centímetros de profundidad de un suelo pueden contener entre 1000 y 10000 kg de N por hectárea. Estas formas orgánicas incluyen proteínas, aminoácidos y azúcares aminados (Plaster, 2000).

El N presente en el suelo bajo formas orgánicas no está disponible para las plantas, sino que para ser absorbido tiene que pasar a formas inorgánicas. El N inorgánico representa un 2% del N total del suelo, encontrándose en formas de nitrato, amonio y nitrito. Estas formas inorgánicas son transitorias en el suelo, por lo cual las cantidades de N inorgánico del suelo son extremadamente variables, pudiendo existir desde unos pocos gramos hasta más de 100 kg por ha (Gutiérrez, 2003).

La dinámica del N en el suelo no está regulada por un equilibrio químico, sino principalmente por procesos biológicos, derivados de la actividad microbiana del suelo que afectan sobre todo a las formas minerales y a las formas orgánicas de reserva. Ejemplos de estos procesos son la mineralización, nitrificación, amonificación, desnitrificación, etcétera (Otegui, *et al.*, 2002).

La mineralización de N es mayor durante la estación de lluvias que en la seca y mayor durante el verano en comparación con el invierno, debido a la actividad diferencial de la microbiota (Schmidt, *et al.*, 1999).

Relación Carbono/Nitrógeno

La relación C/N es un indicador útil del grado de descomposición de la materia orgánica de los suelos (Buol, *et al.*, 2004), ya que permite estimar el nitrógeno que está disponible para las plantas, por lo que se puede utilizar como indicador de calidad de la Materia Orgánica de medios aerobios (Porta, *et al.*, 2003).

La transformación de los compuestos carbonados suministra energía para que proliferen los propios microorganismos encargados de transformarla, de modo que cuando la proporción de carbono con relación al nitrógeno es baja, una gran parte del nitrógeno mineralizado es utilizado por los microorganismos para sintetizar su propia proteína con lo cual hay poca producción de nitrógeno amoniacal que pasa al suelo.

Los residuos orgánicos con una relación C/N baja por lo general contienen bastante nitrógeno para poder satisfacer necesidades de los microorganismos degradadores. Por lo tanto, a medida que los residuos se descomponen habrá nitrógeno en exceso con relación al que necesitan, el cual se liberará como amoníaco. Así las plantas podrán utilizar el nitrógeno a medida que transcurre la descomposición (Navarro y Navarro, 2003).

Fuentes (1994) menciona que la MO con una relación C/N mayor a 15 suministra mucha energía y poco nitrógeno, mientras que con una relación C/N menor a 10 suministra poca energía y mucho nitrógeno. En ambos casos los microorganismos desintegradores se multiplican poco activamente y la MO se descompone con lentitud. En cambio, los residuos vegetales con una relación C/N entre 10 y 15 favorecen la proliferación de los microorganismos y la descomposición rápida de la MO. La acción microbiana puede mineralizar o inmovilizar el nitrógeno, siendo el principal factor que determina que puede

ocurrir la proporción Carbono-Nitrógeno (C/N). El valor de equilibrio de dicha relación depende de los factores que participan en la formación y evolución del suelo como clima, roca madre o vegetación.

Materia Orgánica en el suelo

La materia orgánica del suelo es la fracción orgánica que incluye residuos vegetales y animales en diferentes estados de descomposición, tejidos y células de organismos y sustancias producidas y vertidas por esos organismos. Esta definición incluye tanto a los materiales poco alterados como a aquellos que sí han experimentado cambios de descomposición, transformación y síntesis posterior dentro del suelo. Además se pueden incluir compuestos orgánicos tóxicos, provenientes de las actividades industriales del hombre, como la contaminación de suelos por hidrocarburos del petróleo, que también constituye parte de la materia orgánica del suelo (Etchevers, 1988).

En zonas donde aún existe vegetación natural que no ha sido alterada, los contenidos de materia orgánica son relativamente constantes y las entradas de carbono en forma de materia en descomposición son similares a las salidas en forma de CO₂. Sin embargo, los cambios en el clima, la cobertura vegetal y los aportes de biomasa, alteran los tiempos de residencia de la materia orgánica en el suelo (Anderson, 1992). La cantidad de MOS presente en los suelos está determinada por la cantidad de tejido vegetal fresco que entra al suelo, la muerte de las raíces, la cantidad de carbono humificado y el perdido de forma gaseosa, por erosión y lixiviación.

La descomposición de la MO es una de las funciones más importantes en ecosistemas terrestres, ya que esta regula el ciclo de nutrientes en el suelo (Sayer, *et al.*, 2010). En el proceso de descomposición la materia muerta de las plantas, animales y microorganismos es oxidada y transformada por la comunidad de desintegradores (Stanier, *et al.*, 2005). Dados los requerimientos energéticos de las comunidades de desintegradores, es que tiene lugar el proceso de mineralización que da lugar a la transformación de compuestos orgánicos de la materia a sus formas inorgánicas liberando así los nutrientes minerales en el suelo. Según el grado de transformación de la MOS, se pueden reconocer tres estados: materia orgánica fresca, productos de transformación hacia humus y el humus (Parra, *et al.*, 2003).

Factores que regulan el almacenaje

- Suelo

Los factores se dividen en definidos, limitantes y reductores. Los definidos se refieren al origen del material parental, las propiedades físicas y la composición mineral del suelo (Lal, 2005). Los factores limitantes son la PPN, la composición del bosque y el clima, mientras que los factores reductores incluyen la erosión, deforestación y uso del suelo (Fisher, 2000).

El clima, actuando a través de la temperatura y la humedad, junto con el tipo de vegetación, determinan la cantidad de N de suelos que nunca han sido manejados. En climas donde la temperatura es baja, la actividad de los microorganismos es escasa y, por lo tanto, la velocidad de descomposición de los restos y de la materia orgánica también es muy baja. Al aumentar la humedad de los suelos, aumenta la velocidad de crecimiento vegetal, y con esto la tasa de producción de materia seca. Por ello, los niveles hídricos altos se corresponden con un aumento del contenido de N total del suelo (Celaya, *et al.*, 2015).

El contenido de N total del suelo es mayor en suelos desarrollados bajo praderas que en aquellos desarrollados en bosque, debido a que en un bosque los restos vegetales son depositados en su mayoría en la superficie del suelo. En cambio, en los suelos desarrollados bajo pradera una proporción importante de la materia vegetal está formada por raíces, que cuando mueren permanecen y son desintegradas dentro del suelo.

Topográficamente, según el grado de la pendiente, se desarrollan suelos con distintos contenidos de materia orgánica. En general, los suelos desarrollados sobre superficies planas y bajas presentan mayores contenidos de materia orgánica que aquellos desarrollados sobre pendientes pronunciadas que están expuestas a procesos de erosión.

En cuanto a la orientación de la pendiente, la zona que recibe niveles mayores de radiación solar, tiende a presentar mayores contenidos de MO. En cuanto al tipo de suelo al aumentar el contenido de arcilla del material parental también aumenta el contenido de C orgánico, el cual está relacionado estrechamente con el contenido de N del mismo debido a que la materia orgánica del suelo forma asociaciones con las arcillas que a su vez pueden enriquecerse con la formación del humus.

- Mantillo

Las características químicas de los componentes del mantillo, la naturaleza de la comunidad desintegradora y los factores físicos del medio son los principales factores que regulan de descomposición del mantillo (Aber y Melillo, 2001). De esta manera la calidad del mantillo determina su susceptibilidad a ser degradado, dependiendo de la proporción C/N, así como de los componentes fenólicos y contenido de carbohidratos (Moreno, 2006). La calidad varía dependiendo de la especie vegetal y se relaciona a la cantidad de nutrientes.

El Clima (principalmente temperatura y humedad) determina los patrones de variación estacional del mantillo a través del control que ejerce sobre la producción de hojarasca y el proceso de descomposición de la materia. El microclima, por su parte determina la tasa de recambio del mantillo y mineralización de nutrientes en cuanto al efecto que tiene sobre la biomasa microbiana.

La estructura de la vegetación afecta la producción de hojarasca, calidad química y fenología, resultando en cambios en la cantidad de mantillo acumulado (Waring y Schlesinger, 1985).

Cambio en el estrato arbóreo

Los cambios en la cobertura vegetal afectan los contenidos de carbono (Bolin y Sakumar, 2000). En particular, la deforestación implica la pérdida considerable de C en suelo en un lapso de décadas; la magnitud de esta pérdida depende de los factores que controlan la dinámica del suelo, por ello aún no hay consenso de la cantidad de C que se está perdiendo al cambiar la aptitud del suelo o cuanto se está recuperando cuando el proceso de cambio se invierte (Murty *et al.*, 2002).



Figura 3. Cambio de uso del suelo en el Bosque de *A. religiosa*, CRM.

El contenido de MOS puede cambiar drásticamente debido al manejo, como por ejemplo, cuando se pasa de una situación de campo natural a una situación de laboreo (Figura 3), esto aumenta la superficie específica del mismo que se expone a la actividad microbiana, y aumentan la aireación y la tasa de mineralización de la MOS. Además, con el laboreo aumenta también el riesgo de erosión, ya que ocurre una pérdida preferencial de las fracciones más finas de los primeros centímetros del suelo. Estas fracciones son generalmente las más ricas en MO.

Antecedentes

Mundialmente el contenido de carbono en suelos se obtiene a partir de datos de perfiles de suelo proveniente de mapas edafológicos, cuyos resultados se generalizan con la aplicación de sistemas de información geográfica. En nuestro país, este tipo de estudios es escaso y la mayoría de la información existe para el centro del país (Segura, 2005). En la Tabla 1 se muestran los modelos que se han desarrollado para estimar los reservorios y flujos de C en los ecosistemas (Tabla 1).

Tabla 1. Muestra los antecedentes de modelos que determinan los almacenes de C en suelo.

Lugar	Vegetación	Modelo	Referencia
Oaxaca	Bosque mixto Pino-Encino	CO ₂ Fix para Windows	Ordoñez y Masera, 2001
Michoacán	<i>Pinus pseudostrabus</i>	CO ₂ Fix para Windows	Álvarez y Rubio, 2013

La Tabla 2 muestra los estudios que se tienen para bosques templados y como cambia la concentración de carbono en suelo cuando el uso de suelo deja de ser el original. Se observa que dichos cambios modifican los almacenes de carbono.

Tabla 2. Estudios sobre carbono y cambio de uso de suelo.

Tipo de bosque	Aportación	Referencia
<i>Abies religiosa</i>	Suelo almacena alrededor del 40 % del Ct, a diferencia de las tierras agrícolas en las que es un 10%.	Covaleda, et al., 2011
<i>A. religiosa</i> y Pino- Encino	COS disminuye cuando el bosque está aprovechado o perturbado.	Pérez-Ramírez, et al., 2007

Vela y colaboradores (2012) determinaron, en la Cuenca del Río Magdalena, que de los tres bosques de la zona, el suelo del Bosque de *Abies religiosa* es el que tiene acumulada la mayor parte de Carbono orgánico (>150 Mg ha⁻¹). Considerando cuatro intervalos de niveles de almacenamiento de carbono orgánico, la categoría para éste bosque fue Muy Alto. Por otra parte, concluyen que la Delegación Magdalena Contreras es un área con muy altos contenidos de COS.

En la Tabla 3 se enlistan los estudios previos sobre la relación C/N en México. Como se puede observar, los enfoques son muy distintos, desde la cuantificación de los almacenes, su relación con el nitrógeno, o los cambios provocados por la pérdida de la cobertura de vegetación.

Tabla 3. Concentración, disponibilidad y movimiento de nutrientes del suelo en tres tipos de bosque en México.

Bosque	Aportación	Referencia
Tropical Seco	Las concentraciones de Carbono orgánico y Nitrógeno total fueron más variables en la estación seca a diferencia de la lluviosa.	Ceccon, <i>et al.</i> , 2002
Tropical Caducifolio	La disminución en disponibilidad de Carbono Orgánico disuelto puede promover pérdidas de N por lixiviación o por emisión de los óxidos a la atmósfera.	Montaño, 2008
Pino- Encino	El cambio en la cobertura de vegetación afectó propiedades físicas y químicas del suelo, principalmente Nt. Para el almacén de C, los sitios con vegetación secundaria no han alcanzado los valores que se presentan en sitios con vegetación original después de la reforestación.	Velázquez, 2012

Con respecto al mantillo, Gómez-Díaz y colaboradores (2012) analizaron tres componentes del suelo en bosques: la hojarasca, el humus y otros materiales fragmentados, encontrando que son el tipo de vegetación con mayor y el de menor edad los que presentan contenidos de Carbono significativamente altos en comparación con los estadios sucesionales intermedios.

Justificación

Este trabajo aporta información sobre las propiedades físico-químicas del suelo en parcelas con diferente área basal en el bosque de *Abies religiosa* de la Cuenca del Río Magdalena (CRM), para el cual se determinó la proporción C/N en el suelo y el mantillo. La evaluación de la relación C/N puede determinar cuál es la calidad de la MO en el suelo. Además, se estimaron los almacenes de Carbono y Nitrógeno en el suelo, debido a que no existían reportes previos de los mismos para el bosque de oyamel de la CRM.

Objetivos

General

Estimar la proporción C/N del mantillo y del suelo en el bosque de *Abies religiosa* de la cuenca del río Magdalena en sitios con diferente área basal.

Particulares

- Determinar las diferencias en la relación C/N en el mantillo y en el suelo tanto para la época de lluvias como para la de secas.
- Estimar los almacenes de nutrientes en el suelo de sitios con diferencias en el área basal del estrato arbóreo.

Hipótesis

- Se puede esperar que durante la temporada de lluvias la cantidad de Carbono en el mantillo aumente por la mayor actividad de la biota y el efecto del mayor porcentaje de humedad, mientras que en el suelo aumentaría por la transferencia luego de la descomposición.
- En sitios con mayor área basal arbórea, se espera que aporten mayor cantidad de hojarasca que entra al sistema y por lo tanto de MO, de tal manera que posiblemente presenten relaciones C/N altas en el mantillo y en el suelo.
- La relación C/N sería más alta en el suelo y en el mantillo durante lluvias debido al efecto de la descomposición de la materia orgánica, Lo contrario se esperaría ocurriese en la temporada de secas.

Zona de estudio

a. Ubicación

La cuenca del río Magdalena (CRM) colinda al SE con la cuenca del río Eslava, al NW con las cabeceras de las cuencas de los ríos Hondo, Mixcoac, Barranca de Guadalupe y San Miguel, que se unen al río Magdalena en la parte baja, formando el río Churubusco. Comprende una parte de las delegaciones geopolíticas Magdalena Contreras, Álvaro Obregón y Cuajimalpa (Figura 4).

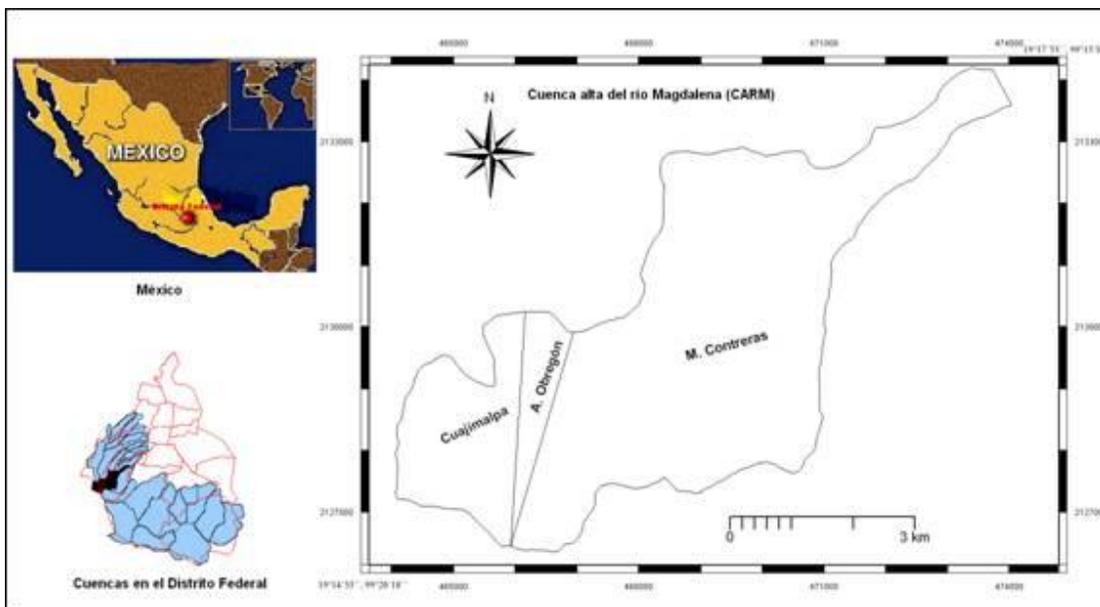


Figura 4. Ubicación de la Cuenca del Río Magdalena (CRM) (Santibáñez, 2009).

b. Clima y suelo

La CRM presenta microclimas que varían de templados a semifríos (García, 1978) Entre los 2400 y 2800 m de altitud se presenta el subtipo climático C (w2) (w) (b) i'g, templado subhúmedo con lluvias en verano, temperatura media anual entre 12 y 18 °C, temperaturas del mes más frío entre -3 y 18 °C y del mes más caliente entre 6.5 y 22 °C. En las partes más altas, de los 2800 a los 3500 m s.n.m., el clima es del tipo Cb' (w2) (w) (b') i g, semifrío con temperaturas medias anuales entre 5 y 12 °C.

Predominan los Andosoles, derivados de cenizas volcánicas. Son suelos muy ligeros, con una permeabilidad alta y un drenaje rápido y moderado; son ligeramente ácidos (pH de

6.0 a 6.5) y ricos en materia orgánica. Son suelos forestales con fuertes pendientes (INEGI 2003). Las partes bajas de la cuenca presentan Andosoles húmicos de textura media limosa a franca arenosa.

c. Vegetación

La Cuenca se encuentra en la zona templada subhúmeda, correspondiente al bosque de Pino y Encino.

Las comunidades principales son los bosques de *Pinus hartwegii* Lindl. (Pino), *Abies religiosa* (HBK) Schlecht. (Oyamel) y *Quercus* sp. (Encino), con distintas asociaciones de especies dentro de ellas. Además, pueden verse intercaladas áreas de cultivo, de pastoreo y matorrales inermes que se constituyen como vegetación secundaria (Ávila, 2002).

d. Bosque de *Abies religiosa*

En cuanto a extensión es el bosque más amplio dentro de la CRM con aproximadamente 1900 ha. Se localiza entre los 2750 y los 3500 m s.n.m., asociado a suelos de tipo Andosol y Pheozem, profundos y desarrollados, de textura media y con abundante contenido de materia orgánica. Es un bosque medianamente denso, con dosel de 20 a 30 m de altura (Álvarez, 2000).

La comunidad está compuesta por especies como *Abies religiosa* (Oyamel), *Senecio angulifolius* DC., *S. barba-johannis* DC., *Eupatorium pazcuarensis* HBK. *Thuidium delicatulum* (Hedw.) Mitt., *Acaena elongata* L., *Salvia elegans* Vahl y *S. Concolor* Lamb. & Benth. Su estrato arbóreo está dominado por *Abies religiosa*. En algunos casos presenta un estrato arbóreo inferior con especies como *Salix paradoxa* Kunth, *Sambucus nigra* var. *canadensis* (L.) Bolli, *Prunus serotina* var. *capullo* (Cav.) McVaugh y varias especies de *Pinus* sp. (Ávila 2002, Nava 2003).

El estrato arbustivo es de 2 a 3 m de alto y con cobertura de 30% aunque en algunos segmentos llega a ser más denso. En el estrato herbáceo domina *Acaena elongata* L. y solo representa el 10% de la cobertura. Sólo en algunos sitios se encuentra un estrato rasante, de musgo principalmente, con coberturas menores al 15% (Ávila 2002, Nava 2003).

Métodos

a) Muestreo en Campo

Se establecieron seis parcelas de 25 x 25 m con diferencias de estrato arbóreo en el gradiente altitudinal del bosque de *Abies religiosa* (figura 5) y se tomaron sistemáticamente 5 muestras simples como se muestra en la figura 12. Lo que se muestreo fueron los primeros diez centímetros del suelo. Los mismos sitios y lugares fueron muestreados durante la época lluviosa y la de sequía (septiembre-diciembre, 2013 y marzo a mayo 2014).

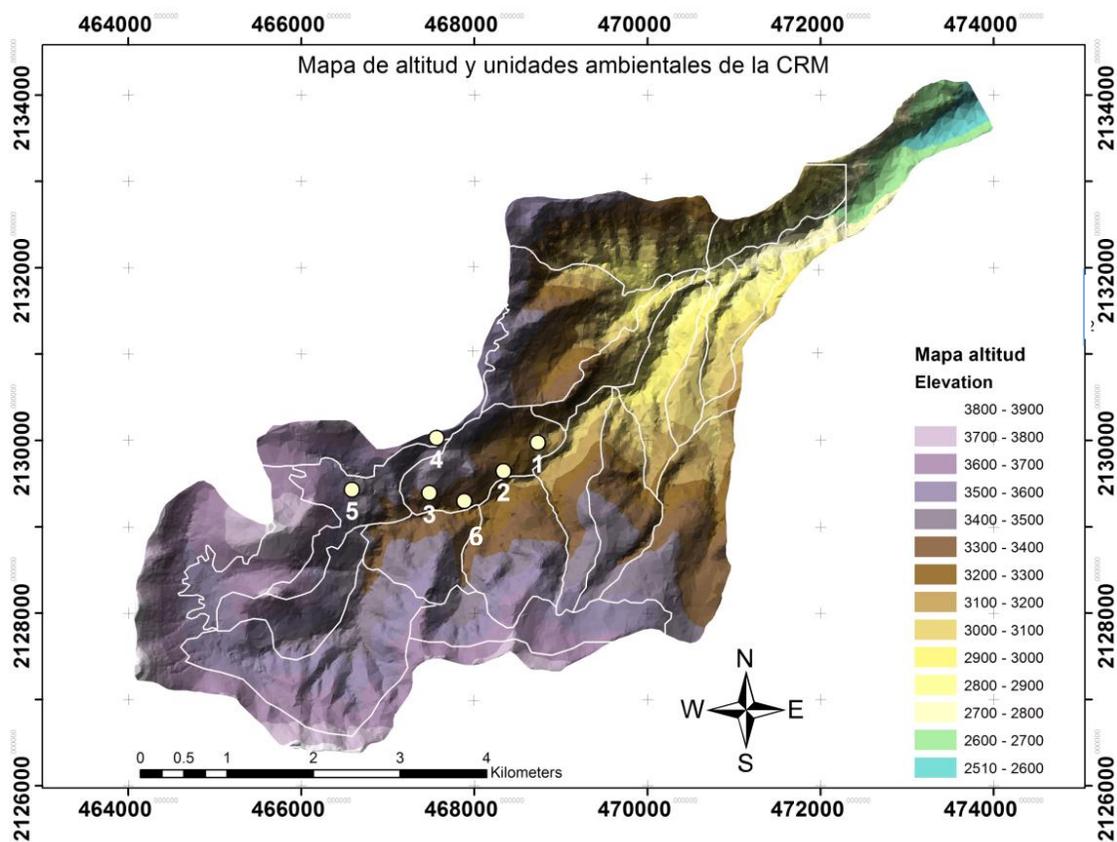


Figura 5. Distribución de los sitios de muestreo (1 a 6) bosque de *Abies religiosa*. Las líneas representan las unidades ambientales de acuerdo a Santibáñez (2009).

Los seis sitios de muestreo se describen de la figura 6 a la 11, que se dividen de acuerdo a su área basal desde el más alto en orden descendente.



Área basal: 3.1 m²

Coordenadas: Información no disponible

Altitud: Información no disponible

Vegetación dominante: *Abies religiosa*

Figura 6. Sitio de muestreo con mayor cobertura de árboles.



Área basal: 2.4 m²

Coordenadas: 21°29'391'' N, 46°74'80'' W

Altitud: 3225,6 m s.n.m.

Vegetación dominante: arbustos, los árboles únicamente son de la especie de *Abies religiosa* y mitad de la parcela es dominada por hierbas.

Figura 7. Sitio de muestreo 3.



Área basal: 1.8 m²

Coordenadas: 21°29'643'' N, 46°83'38'' W

Altitud: 3205 m s.n.m.

Vegetación dominante: estrato arbustivo de diferentes especies, sigue el herbáceo y finalmente el arbóreo.

Figura 8. Sitio de muestreo 2.



Área basal: 1.7 m²

Coordenadas: 21°29'973'' N, 46°87'34'' W

Altitud: 3204,7 m s.n.m.

Vegetación dominante: *Abies religiosa* y gran cantidad de herbáceas.

Figura 9. Sitio de muestreo 1.



Área basal: 1.0 m²

Coordenadas: 21°29'428" N, 46°65'86" W

Altitud: 3507 m s.n.m.

Vegetación dominante: unos pocos árboles de Pino, predomina la presencia del estrato herbáceo y arbustivo.

Figura 10. Sitio de muestreo 5.



Área basal: 0 m²

Coordenadas: 21°30'028" N, 46°75'64" W

Altitud: 3444 m s.n.m.

Vegetación dominante: pastos y dos especies de arbustos poco distribuidos.

Figura 11. Sitio de muestreo 4.

Propiedades físico-químicas del suelo para cada sitio

Con base en los análisis edáficos realizados, en la tabla 4 se describen las características de los sitios de estudio.

Tabla 4. Características físico-químicas y edafológicas de cada sitio de estudio. Los primeros datos son de temporada de lluvias siguiéndolos los de la de secas en la segunda fila (Facio, 2015).

Sitio (Área basal m ²)	Densidad Real	Densidad Aparente	pH	Conductividad μS/cm	Color	Textura	Porosidad (%)
3.1	2.0±0.1	0.4±0.1	5.26±0.1	64.3±9.2	7.5YR 3/2	Franco limo- arenosa	80±6.5
	2.0±0.1	0.2±0.1	5.7±0.1	40.0±0.1			90±1.2
2.4	1.6±0.1	0.4±0.1	4.9±0.1	27.6±4.4	7.5YR 3/2	Franco limo- arenosa	75±2.1
	1.4±0.2	0.2±0.1	5.8±0.1	34.2±0.1			86±3.2
1.8	2.0±0.1	0.5±0.1	5.4±0.1	21.8±2.8	10YR 3/3	Franco limo- arenosa	75±0.1
	1.8±0.1	0.3±0.1	5.9±0.1	42.2±0.1			83±2.4
1.7	1.7±0.3	0.3±0.1	5.5±0.1	38.9±2.1	7.5YR 2.5/1	Franco limo- arenosa	86±6.6
	1.4±0.1	0.2±0.1	5.9±0.1	35.4±0.1			82±1.6
1.0	2.0±0.2	0.3±0.1	4.9±0.1	49.4±4.2	10YR 2/1	Franco limo- arenosa	85±1.2
	1.8±0.1	0.3±0.1	5.4±0.1	32.4±0.1			83±3.4
0	1.7±0.1	0.3±0.1	4.7±0.1	56.2±3.4	10YR 2/1	Franco limo- arenosa	82±2.3
	1.8±0.2	0.2±0.1	5.0±0.2	47.0±0.1			90±1.8

Para cada sitio:

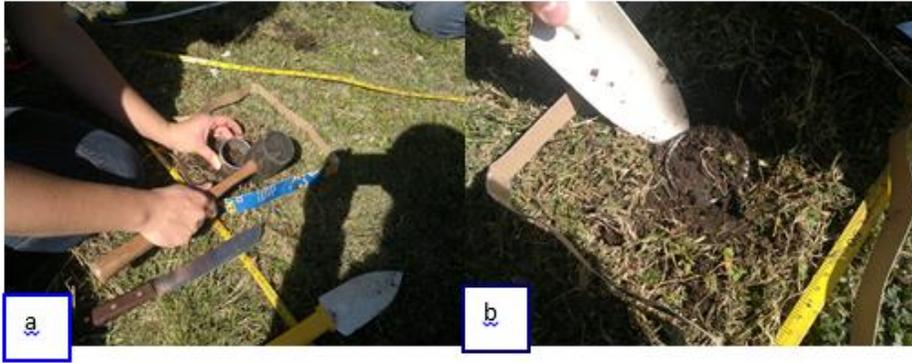


Figura 12. a. Representación de la parcela con el lugar de extracción de muestras (señalado con flechas). b. El cuadro representa el lugar del que se tomó la muestra de mantillo. El círculo muestra el lugar del que se extrajo la muestra de suelo. El procedimiento se repitió en cada una de las parcelas.

8.1.1 Suelo

Densidad aparente y densidad real

En el campo se enterró un cilindro de metal (figuras 13 a y 13 b) de 100 cm³ a aproximadamente 8 cm en el suelo usando un martillo, y se extrajo para vaciar el contenido en una bolsa de plástico teniendo precaución de no perder muestra; posteriormente se trasladó en hielera para análisis de laboratorio y no perder humedad.



Figuras 13 a. Enterrado de cilindro. 13 b. Extracción de cilindro para obtención de densidad real y aparente.

8.1.2 Mantillo:

Se colocó un cuadrado de cartón de 25 cm para extraer la muestra de mantillo (Figura 14). Para el sitio de muestreo que no presenta arboles no se recolectó ésta muestra puesto que no existía. La cantidad colectada es variable.



Figura 14. Recolección de muestra de mantillo.

b) Análisis de variables

8.2.1 Suelo;

A cada muestra de suelo se le determinó cantidad de materia orgánica, C total, N total, pH, densidad aparente y densidad real, color, textura y porosidad.

8.2.1.1 Carbono total

Se tomó una alícuota añadiendo 3 gotas de HCl al 10% para determinar la presencia o ausencia de carbonatos (Siebe, *et al.* 1996).

Se comprobó que los suelos de los sitios están libres de carbonatos (CaCO_3), que se ratifica por el pH de fuertemente ácidos a ligeramente ácidos (4.7-5.9), por lo que se asume que el carbón presente es totalmente orgánico.

Para determinar el C en suelo, se secó a 60° durante tres días, se tamizó en una malla de 2 mm (figura 15), para después moler 40 g en un pulverizador para suelos y obtener un polvo más fino.



Figura 15. Tamizado de muestra de suelo

Las muestras de suelo seco y molido se etiquetaron y guardaron en sobres para posteriores análisis en el Colegio de Posgraduados (COLPOS) (figura 16).



Figura 16. Sobres etiquetados con muestras de suelo.

El análisis de carbono total se llevó a cabo en el Colegio de Posgraduados en un analizador para sólidos marca Shimadzu SSM- 5000A con una sensibilidad de 0,1 a 30 mg CT. La medición de Carbono Total se realizó basándose en el método de oxidación, por medio de un catalizador cobalto-platino en un horno a 900°C (el cual es parte del módulo de sólidos), éstas condiciones promueven la oxidación para convertir todo el carbón en CO₂, y este a su vez sea medido por la celda de infrarrojo no dispersivo para interpretarse como carbón total (Shimadzu, 2011).

8.2.1.2 Nitrógeno total

Para determinar el Nitrógeno total en suelo, la muestra se secó a 60 ° durante tres días, se tamizó en una malla de 2 mm y después se molió en un pulverizador para suelos.

El análisis de nitrógeno total se llevó a cabo en el Colegio de Posgraduados en un analizador para sólidos marca Shimadzu SSM- 5000A con una sensibilidad 0.01 mg NT. La medición de NT al igual que el CT está basada en la combustión completa e instantánea de la muestra (Método de combustión directa de Dumas) en una atmósfera de oxígeno puro a 900 °C. El nitrógeno se transforma mediante dicha combustión a NO (monóxido de nitrógeno), posteriormente este gas es llevado por un gas acarreador (He) al detector donde es medido por el método de quimioluminiscencia desarrollado por Shimadzu (asegurando una medición libre de interferencias ya que se realiza al mismo tiempo que se

produce la combustión). Los resultados son procesados teniendo en cuenta el peso de la muestra y los datos obtenidos a partir de un patrón. Con esto se obtiene el porcentaje de NT contenido en la muestra (Shimadzu, 2011).

Las muestras se corrieron junto con un material de referencia: LECO soil calibration sample for CNS part 502-309.

8.2.1.3 Densidad aparente (Blake y Hartge, 1986).

Previamente en el laboratorio se lavaron las cajas Petri para después dejarse secar y pesarlas con una precisión de 0.001g.

Al regresar de campo se desempaco la muestra, se colocó en la caja Petri correspondiente, debidamente marcada, y se pesó. Para después restarle el peso de la caja vacía (A). Posteriormente se introdujeron las muestras a la estufa a 105° C durante 24 horas. Después se sacaron las muestras de la estufa y se metieron a un desecador durante dos horas para esperar a que se enfriaran a temperatura del ambiente para pesarlas en la misma balanza (B).

El porcentaje de humedad se obtuvo mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Humedad (\%)} = (A-B)/A*100$$

Y la densidad aparente (Reyes, 1996):

$$D.A \text{ (g/cm}^3\text{)} = \text{Peso B (g)}/\text{Volumen del cilindro (cm}^3\text{)}$$

8.2.1.4 Densidad real por el método de picnómetro para suelos

Este procedimiento se realizó con las muestras que fueron utilizadas para la densidad aparente.

Se pesaron los picnómetros con tapa, vacíos y secos, se añadió 5 g de suelo y después se agregó una tercera parte de agua destilada hervida y fría (17 a). Después de romperse la tensión, se llenó con agua hasta el cuello del picnómetro y se eliminó todas las burbujas, dejando salir una gota de agua del capilar (17 b). Se volvió a pesar el picnómetro, se vació y se rellenó con agua, midiendo la temperatura de ésta para poder determinar su densidad según comparación en tablas.

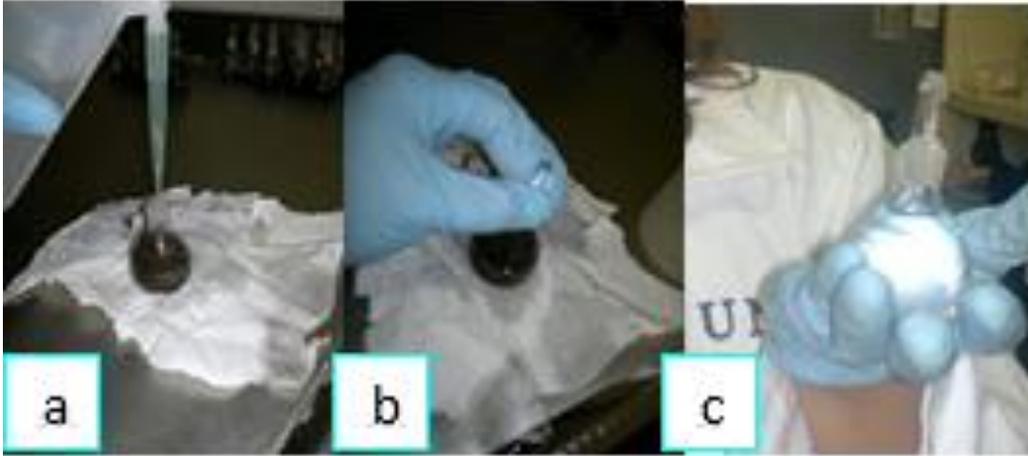


Figura 17. Procedimiento para la determinación de Densidad Real para suelos más agua en homogenización. b. Capilar dejando escapar la gota de agua. c. Picnómetro sin suelo.

La densidad real se obtuvo mediante la siguiente fórmula (Donahue *et al*, 1977).

$$\rho_r = \rho_a * (P_s - P_v) / ((P_s - P_v) - (P_{sa} - P_a))$$

ρ_r : densidad real del suelo (g/cm³)

ρ_a : densidad real del agua (g/cm³)

8.2.2 Mantillo

A cada muestra de mantillo se le determinó C total y N total.

8.2.2.1. Contenido de C en mantillo.

Las muestras de mantillo fueron clasificadas y luego sometidas a secado en estufa a 60° C. Posteriormente se pulverizaron (18 b) en un molino electrónico de rotor (Pulverisette 14 de velocidad variable) (18 a). Las muestras se almacenaron para posteriores determinaciones.

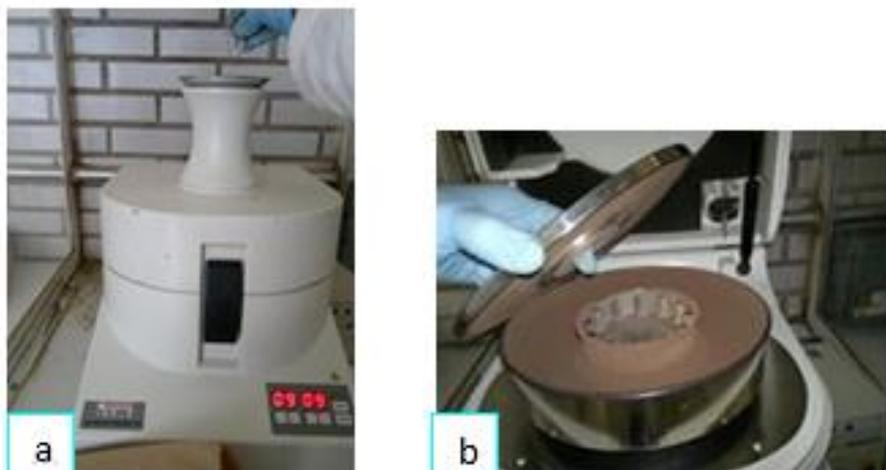


Figura 18 a. Molino para materiales sólidos orgánicos. 18 b. Muestra pulverizada en molino.

En un analizador elemental de C y N CNHS/O, se determinaron los porcentajes de C de los diferentes componentes para las muestras. La biomasa del mantillo se multiplicó por el porcentaje de C obtenido de las muestras y de este modo se obtuvo la cantidad de C total.

8.2.2.2 Contenido de N en mantillo.

Las muestras de mantillo fueron clasificadas y luego sometidas a secado en estufa a 60° C. Posteriormente se pulverizaron en un molino para posteriores determinaciones

Análisis de resultados

Se determinó la relación C/N dividiendo los porcentajes de Ct entre el valor de Nt.

Para cualquier prueba estadística de ANdeVA que mostró diferencias significativas se aplicó una prueba *Post Hoc* de Tukey.

Para cualquier prueba estadística de Kruskal-Wallis se obtuvo la comparación múltiple de medias.

Lluvias

Suelo

En temporada lluviosa, para las variables Ct y Nt en el suelo, no se encontró normalidad en la distribución de los datos y por lo tanto, se usó prueba no paramétrica de Kruskal Wallis; para la relación C/N se realizó un ANdeVA de una vía.

Mantillo

Los valores de Nitrógeno total en el mantillo, se transformaron con la raíz cuadrada a fin de obtener normalidad en los datos y poder aplicar pruebas de estadística paramétrica (ANdeVA). Para Ct se realizó ANdeVA. Se utilizó la prueba no paramétrica Kruskal Wallis; para la relación C/N.

Secas

Suelo

Para temporada de secas, en los datos para suelo se buscó normalidad en los datos para las variables de Carbono total y Nitrógeno total y cuando mostraron distribución normal se aplicó una prueba paramétrica ANdeVA de una vía. Para la variable relación C/N, al no existir normalidad en la distribución de los datos se aplicó la prueba de Kruskal Wallis.

Mantillo

Finalmente, para los datos del mantillo en temporada seca se aplicó una prueba paramétrica ANdeVA cuando mostraron distribución normal los datos de Ct y Nt. Por otra parte, en cuanto a la relación C/N al no existir normalidad se aplicó la prueba de Kruskal Wallis.

Comparación entre temporadas

Suelo

Para obtener la comparación entre temporadas se aplicó U de Mann Whitney al no existir normalidad en la distribución de los datos para las variables Ct y Nt en suelo. Mientras que, para la relación C/N se aplicó T de Student.

Mantillo

Mediante T de Student se realizó una comparación de las temporadas para las variables de Ct y Nt, mientras que para la proporción C/N se usó U de Mann Whitney.

Almacén de nutrientes

Para determinar el valor del almacén de Carbono y Nitrógeno en suelo, se usó el dato original (valor porcentual) utilizando la siguiente fórmula (Vela, 2012):

$CC = P_m * D_{Ap} * \%C$, donde;

CC= Cantidad de Carbono ($Mg\ ha^{-1}$).

Pm= Profundidad (cm).

D_{Ap}= Densidad Aparente del Suelo ($g\ cm^{-3}$).

C= Porcentaje de Carbono por muestra

Para los almacenes en el mantillo, se multiplico la cantidad del elemento por la cantidad total de hojarasca muestreada.

Finalmente se aplicó χ^2 de bondad de ajuste para cada grupo de datos en ambos almacenes.

Resultados

Suelo

Nitrógeno total

La concentración de nitrógeno en época de lluvias mostro que no hay diferencias significativas (< 0.05) entre los sitios (figura 19a). Sin embargo, es evidente que las menores concentraciones las presentan los sitios con coberturas intermedias. De igual manera, no se encontraron diferencias significativas para secas pero la tendencia es que disminuye la cantidad del elemento en cuanto aumenta la cobertura arbórea (figura 19b). Con respecto al Nt, la prueba no mostró diferencias significativas entre temporadas ($p= 0.2197$).

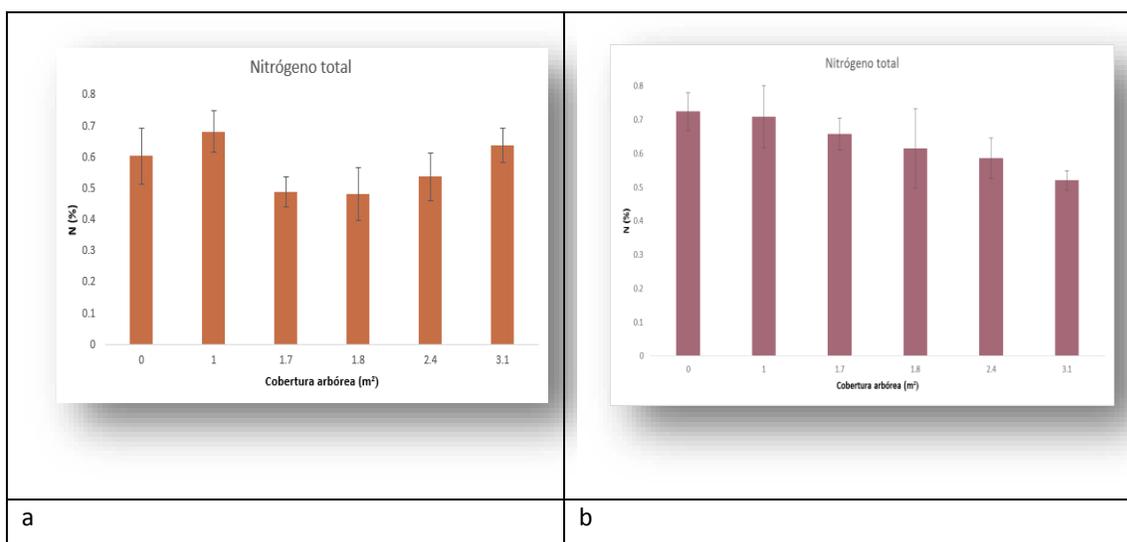


Figura 19a. Promedio (\pm e.e.) del porcentaje de Nitrógeno en suelo para cada sitio en lluvias. 19b. En temporada de secas.

Carbono total

Para época de lluvias, la cantidad de C en suelo no muestra diferencias significativas; sin embargo, el sitio sin árboles tiene la concentración más baja (figura 20a). Con respecto a secas tampoco se encontraron diferencias significativas pero la tendencia es que los sitios con valores altos y bajos de cobertura arbórea presentan las menores concentraciones del elemento (figura 20b). Para el Ct, la prueba estadística determinó que si hay diferencias significativas entre temporadas ($U= 297.50$, $p= 0.0247$).

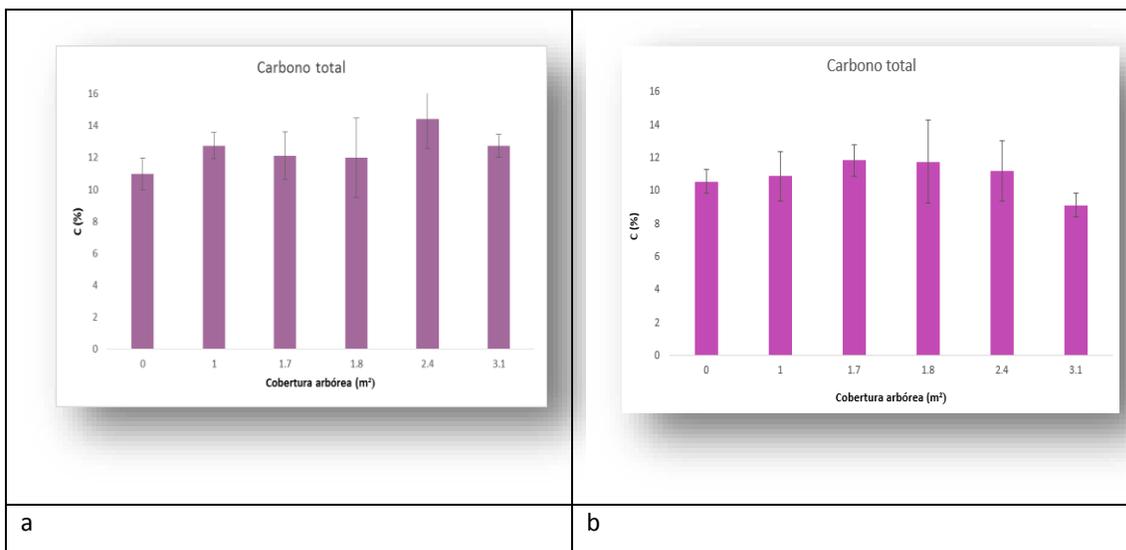


Figura 20. Promedio (\pm e.e.) del porcentaje de Carbono para cada sitio en temporada lluviosa y de secas a y b respectivamente.

Relación Carbono- Nitrógeno

Con base en la relación C/N, a pesar de no haber encontrado diferencias significativas en lluvias, es evidente que las áreas basales de 1.7 a 2.4 presentan relaciones más altas que el resto de los sitios (figura 21a). Si hay diferencias significativas para sequía ($X^2=18.800$, $gl= 5$, $p= 0.0021$) respecto a ésta variable; los dos sitios con menor presencia de árboles presentan la relación C/N mas baja (figura 21b). Respecto a la comparación entre temporadas se encontró que existen diferencias significativas ($t= 5.06$, $p=0001$).

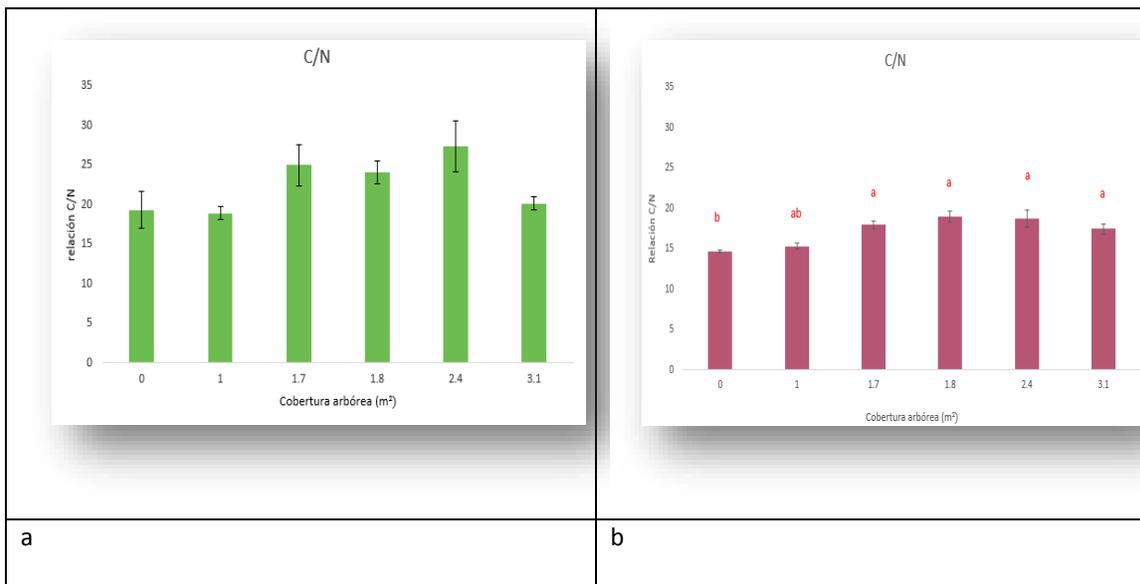


Figura 21a. Promedio (\pm e.e.) de la relación carbono- nitrógeno para cada sitio en temporada lluviosa. Figura 21b. Promedio (\pm e.e.) para la relación Carbono- Nitrógeno de cada sitio en temporada de secas. Letras diferentes representan diferencias significativas de acuerdo con Tukey ($p \leq 0.5$).

Mantillo

Nitrógeno total

Para la cantidad de nitrógeno presente en el mantillo, el Análisis, mostró diferencias significativas entre sitios para lluvias ($F_{5,24} = 24.85$, $p = 0.001$). Se encontró que fue el sitio con área basal de 1.0 m² diferente, al presentar la concentración de nitrógeno un cincuenta por ciento más elevada que el resto (figura 22a). También para sequía se encontró diferencias significativas ($F_{4,20} = 21.43$, $p = 0.001$). Evidentemente, el mismo sitio tuvo los valores de concentración más altos (figura 22b). Por otra parte, entre temporadas no se encontraron diferencias significativas ($p = 0.1298$).

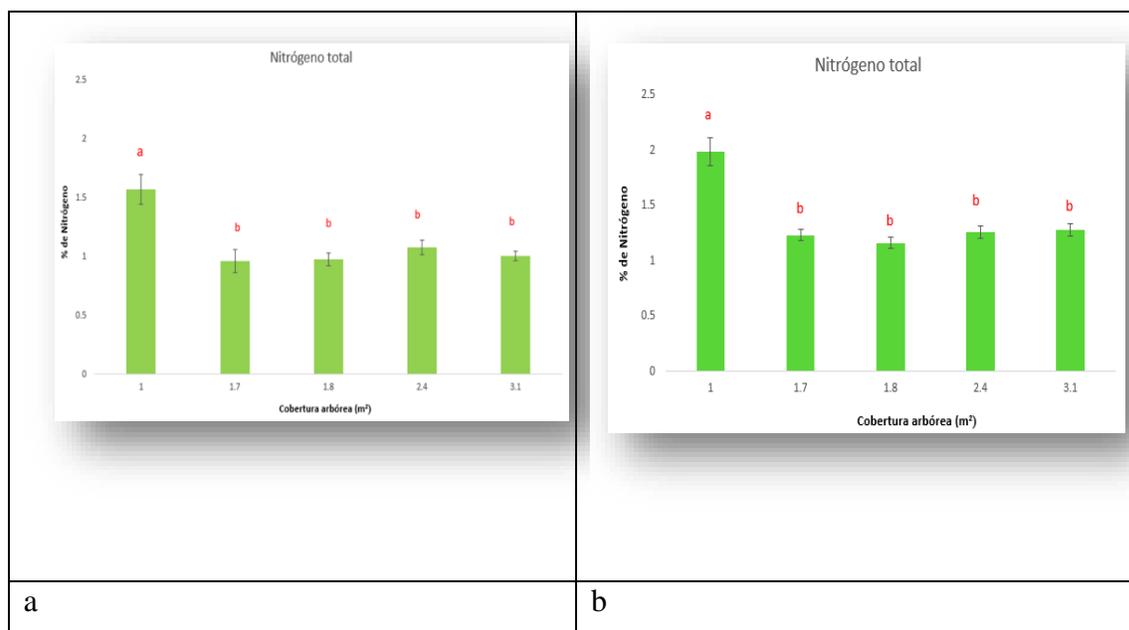


Figura 22a. y 22b. Promedio (\pm e.e.) del porcentaje de Nitrógeno para cada sitio en ambas temporadas. Letras diferentes representan diferencias significativas con un post-hoc de Tukey ($p \leq 0.5$).

Carbono total

Para la concentración de carbono en mantillo, no se encontraron diferencias significativas entre sitios ni para secas o lluvias (figura 23). Sin embargo, para lluvias la mayor concentración del C en el mantillo es para el sitio con la mayor presencia de árboles que tiene área basal de 3.1 m² (figura 23a), en secas son los dos sitios con coberturas extremas que presentan el valor de Carbono mayor (figura 23b). Por otra parte, entre temporadas no se encontraron diferencias significativas ($p= 0.9434$).

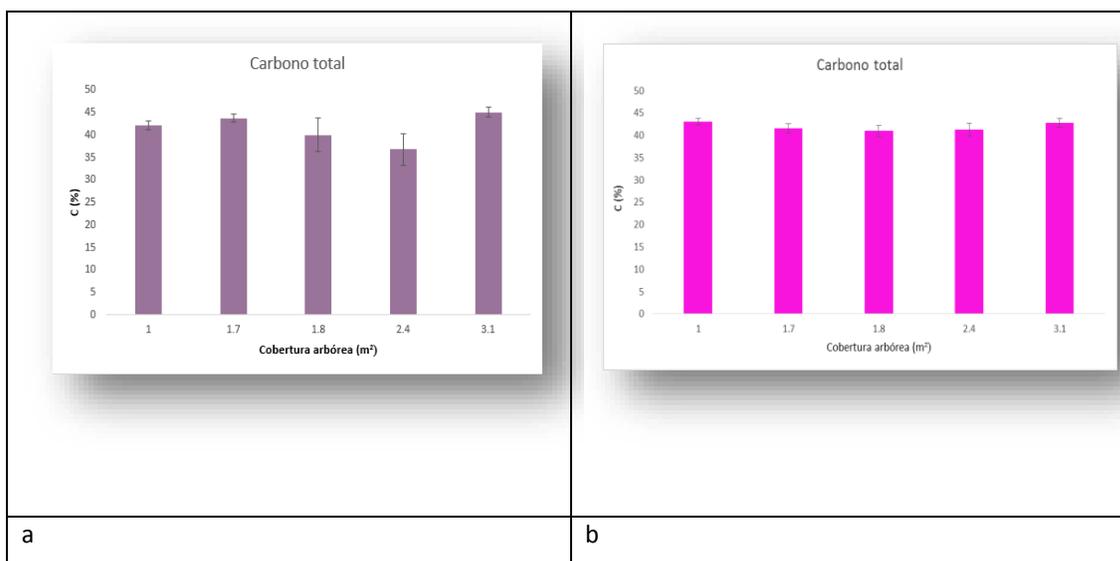


Figura 23a. Promedio (\pm e.e.) del porcentaje de Carbono para los sitios en Lluvias. 23b. En temporada de secas.

Relación Carbono- Nitrógeno

Para la relación C/N existen diferencias significativas ($X^2=17.200$, $gl= 5$, $p= 0.0041$) en temporada lluviosa; el sitio con menor cobertura de árboles presenta, a su vez el menor cociente (Figura 24a). No se encontraron diferencias significativas para ésta variable en temporada de secas entre los sitios. Sin embargo, es evidente que el de area basal más baja presenta valores de la relación C/N menor (figura 24b). Se encontró que hay diferencias significativas ($U=218.50$ $p=0.0251$) entre las temporadas.

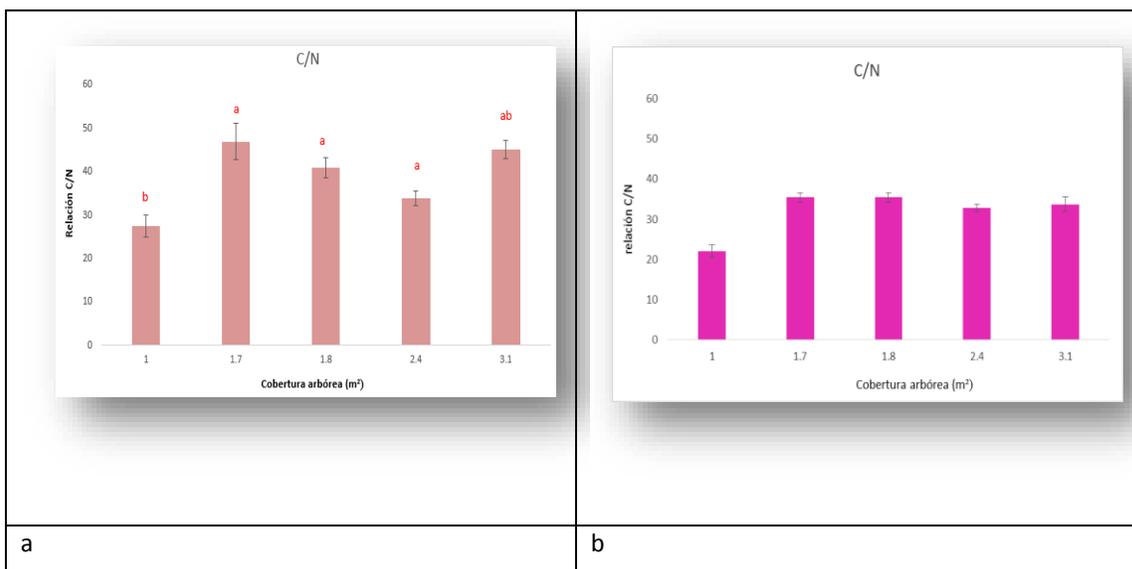


Figura 24a. Promedio (\pm e.e.) para la relación Carbono/ Nitrógeno para los sitios en temporada lluviosa. Letras diferentes representan diferencias significativas con prueba de Tukey ($p \leq 0.5$). Figura 24b. Promedio (\pm e.e.) para la relación Carbono- Nitrógeno de cada sitio en temporada de sequía.

Almacén de nutrientes

Con respecto a los almacenes en el suelo y el mantillo, en las tablas 5 y 6 se muestran la cantidad de Ct y Nt por sitio para ambas temporadas del año. Los sitios sin presencia de árboles, presentaron la menor concentración de Carbono en el suelo.

Tabla 5. Muestra la cantidad de nutrientes para el almacén suelo. Cantidad contenida en 240 g de biomasa. Los primeros datos son de temporada de lluvias seguidos por los de secas en la segunda fila.

Cobertura arbórea (m ²)	Ct (Mg ha ⁻¹)	Nt (Mg ha ⁻¹)
3.1	104,157	5,210
	90,401	2,160
2.4	113,844	4,248
	92,560	2,312
1.8	104,694	4,258
	87,690	2,429
1.7	95,527	3,854
	95,356	2,505
1.0	99,589	5,296
	88,773	2,889
0	90,103	4,925
	79,889	3,261

Tabla 6. Muestra la cantidad de nutrientes para el almacén mantillo. Los primeros datos son de temporada de lluvias siguiéndolos los de la de secas en la segunda fila.

Cobertura arbórea (m²)	Biomasa (g)	Ct (%)	Nt (%)
3.1	18	0.46	0.96
	59	0.46	1.56
2.4	168	0.54	1.85
	58	0.48	1.58
1.8	102	0.49	2.04
	74	0.48	1.72
1.7	80	0.45	2.07
	57	0.48	1.62
1.0	6	0.47	1.27
	15	0.46	1.00

Para el almacén suelo, respecto a Nt y Ct; Ji² de bondad de ajuste demuestra que no hay diferencias significativas en temporada de secas o lluviosa ($p > 0.05$). Es evidente que las concentraciones de Carbono son mayores en los sitios con mayor área basal. Por otra parte, es claro que las concentraciones de Nitrógeno en éste mismo almacén son menores para secas.

Para el mantillo, con prueba Ji² de bondad de ajuste se encontró que no hay diferencias significativas entre temporadas ($p > 0.05$). Los valores de Nitrógeno son más altos para sitios con área basal de 1.7 y 1.8 m².

Discusión

Debido a que los suelos de estudio se desarrollaron en superficies cumbrales, se consideran de formación *in situ* a partir de cenizas volcánicas, tiempo durante el cual han recibido diferentes aportes de materiales que al acumularse han propiciado la formación de un mantillo sobre el suelo de acuerdo al tipo de vegetación y usos antrópicos.

El color de los suelos en general es café oscuro (7.5 YR 3/2-10 YR 3/3), debido a que la parte superficial del suelo es afectada por acumulación de materia orgánica, donde parte de ella es rápidamente mineralizada durante los meses de lluvias a polímeros de bajo peso molecular (ácidos fúlvicos), los cuales bajo condiciones de saturación propician la disminución del pH que disuelve minerales volcánicos fácilmente intemperizables, así como la protonación de los grupos funcionales libres de la materia orgánica propiciando la liberación de iones metálicos (Etchevers, 1988).

Con base en los resultados de los análisis físico-químicos, la parte superficial de los suelos presenta una alta porosidad del 75 al 90% lo que presupone una buena oxigenación, con buen drenado hacia capas inferiores. El pH en temporada de lluvias de 4.7 a 5.5 se clasifica como muy ácido para todos los sitios incrementándose en temporada de secas a ligeramente ácido 5.7 a 5.9, exceptuando los sitios de área basal de 0 y 1.0 m² que aunque incrementan ligeramente se mantienen en la clasificación de muy ácidos (Etchevers, 1988). DE acuerdo a este autor, los pH ácidos no destruyen la materia orgánica solo mantienen protonados sus grupos funcionales.

Mantillo

Para nitrógeno total en mantillo durante la temporada de lluvias presentó una mayor concentración en el sitio de área basal con 1.0 m² observándose diferencias significativas con el resto de los sitios, lo cual puede ser producto de la presencia de microorganismos que descomponen la materia orgánica en forma de nitrógeno amoniacal. Se observa en la figura 22 que ocurre lo mismo en temporadas de secas pero en escala más alta de concentración por una mayor acumulación, comparada con la temporada de lluvia, lo que puede deberse a que en temporada de lluvias hay oxidación biológica de amonio en nitritos, seguido por la oxidación de esos nitritos en nitratos. El nitrógeno en forma de nitrato

es muy soluble al agua; las plantas lo pueden aprovechar fácilmente, pero se pierde con la lluvia, o bien se desnitrifica y se pierde en forma de gas.

La concentración del carbono total en el mantillo en temporada de seca es relativamente homogénea pues se mantiene entre 40 y 45% en todos los sitios lo que indica estabilidad de la humedad y temperatura; en temporada de lluvias la concentración de carbono es variable y se debe a que la actividad microbiana se dispara mineralizando la materia orgánica y esta variabilidad está correlacionada con la calidad de la materia orgánica del sitio. Husch (2001) sostiene que en promedio la materia vegetal seca contiene 50% de carbono, y el sitio que presenta mayor cobertura y área basal con vegetación original fue en el que se realizó la colecta de mantillo más abundante. Pérez (2006) encontró que en un bosque de Pátzcuaro, Michoacán, dentro de una zona de reforestación, la concentración de C fue de 46.4% a diferencia de sitios con diferentes usos de suelo, el de uso agrícola presentaba 12 %.

De acuerdo con Cruz y Etchevers (2011) después del suelo, el mantillo es la segunda reserva de carbono en suelos forestales. Se observó que la proporción C/N del mantillo en temporada de secas se mantuvo relativamente constante con un promedio de 35 en los sitios con un área basal de 1.7 a 3.1 m², lo que coincide con lo reportado en hojarasca de bosques mixtos por Rocha y Ramírez (2009). Entre más alta sea la proporción C/N la materia orgánica empieza a ser más resistente a la descomposición y aparecen las deficiencias de nitrógeno. Excepto para el sitio con una área basal de 1.0 m² que tuvo un valor de 20 que indica un pobre aporte de la mineralización de la materia orgánica y suministro lento de nitrógeno, pero como se discutió previamente se observa en mayor concentración en este sitio en lluvias y secas comparado con los demás sitios (fig. 22). En temporada de lluvias la proporción C/N del mantillo en los sitios es variable.

Se ha reportado que las tasas de descomposición y de mineralización disminuyen según transcurre la sucesión (plantas herbáceas a plantas con estructuras leñosas y relaciones de C/N altas) (Ruíz, 2012). Las características del mantillo asociado a los ecosistemas de bosques caducifolios y bosques de coníferas en México, se explican por la fisiología de los árboles, que al inmovilizar nutrientes en sus partes leñosas contribuyen al empobrecimiento del suelo (Nilsson et al., 1982). Ello favorece la inmovilización de los nutrientes, por lo que los ecosistemas se adaptan mediante la restricción del número de organismos que compiten en el uso de los nutrientes, al menos durante la fase de crecimiento intenso de los árboles.

Entonces para la temporada de lluvias el sitio con mayor C/N fue el de área basal de 1.7 m², que presentó la tasa de mineralización más baja seguido del sitio con más árboles. En temporada de secas el sitio con área basal de 1.8 m² está presentando el valor C/N más alto, y por tanto la menor tasa de mineralización. Una descomposición lenta reduce la disponibilidad de nutrientes para el nuevo crecimiento, debido a la inmovilización de estos en la acumulación de detritus.

Suelo

En los suelos el nitrógeno total en temporada de secas se observa con un gradiente de concentración de mayor a menor de 0.75 a 0.55% del sitio sin mantillo (0), que presenta mayor cantidad de herbáceas, al de mayor área basal (3.1) con vegetación dominante de *Abies religiosa*. Briseño *et al.* (2002) plantean que las cantidades de nitrógeno en el suelo varían dependiendo de la especie forestal y que es proporcional a la biomasa. En temporada de lluvias en comparación con la temporada de secas, las concentraciones de nitrógeno total disminuyen y son variables, en el sitio de 1.8 m² la disponibilidad de N en suelo y mantillo es media. Se ha señalado que en los suelos moderadamente ácidos se logra una correcta nitrificación (Vergara, 2005) y la variabilidad que se observa en los sitios (fig. 19) puede deberse a la solubilidad del nitrógeno en forma de nitratos y su pérdida por lixiviación. Los porcentajes de nitrificación encontrados para la CRM son de 92 a 97%, lo cual es muy alto en comparación con otros bosques del mundo y puede deberse a que para la cuenca existe una gran deposición de nitrógeno antropogénico debido a la cercanía con la Ciudad de México (Delgadillo, 2011). De acuerdo con Fenn *et al.* (1999) los bosques de coníferas del Valle de México reciben un depósito atmosférico de N 4 a 11 veces mayor que en zonas alejadas, por lo que asimilan cantidades de N en exceso directamente a través del follaje o por absorción radical, cuando el N se incorpora al suelo, lo que fue corroborado por Chávez *et al.* (2006) quienes midieron la absorción foliar directa de nitrógeno en condiciones de invernadero; la cantidad de nitrato (NO₃⁻) y amonio (NH₄⁺) fijado en la biomasa de follaje de *Abies religiosa* tuvo un valor medio de N recuperado de 5.3% para NH₄⁺ y 4.7 % para NO₃⁻ con la mayor absorción de N por absorción radical. De acuerdo con estos resultados hay un alto potencial de absorción foliar de N en *Abies religiosa*.

El carbono total en el suelo en temporada de secas fue de 9.1 a 11.9% observándose el valor menor en el sitio de mayor área basal (3.1) lo que puede deberse a que por mayor

presencia de árboles, el mantillo mantiene por mayor tiempo la humedad en el suelo lo que favorece una mayor mineralización de la materia orgánica. Para la época de lluvias los valores de C en el suelo se encontraron entre 11 y 14.4%; haber registrado mayores concentraciones en ésta última temporada, puede deberse a la mayor acumulación de materia orgánica por el arrastre de la lluvia y escorrentía.

Gundersen *et al.* (2006) emplearon la proporción C/N como indicador de la disponibilidad de N en suelos de bosques de coníferas, considerando que un ecosistema con N limitado tiene valores mayores a 30, con disponibilidad media entre 25 y 30, y saturado si es menor a 25; de acuerdo a lo anterior mis sitios de estudio en temporada de lluvias, con área basal arbórea de 0, 1.0 y 3.1 m² presentan valores que presuponen que hay disponibilidad de N y éste elemento no está siendo limitante, mientras que para los sitios que van de 2.4 a 1.7 m² de área basal con valores de entre 26 y 28, la disponibilidad de N es media. En época de secas los sitios presentaron una buena actividad biológica actuando en la descomposición y mineralización de la materia orgánica, requiriendo Carbono como fuente de energía y Nitrógeno como intermediario en la síntesis de proteínas ya que el rango está oscilando entre los 15 y 18 (fig. 21). Cabe señalar que Delgadillo (2011) reporta en los bosque de *A. religiosa* de la cuenca los datos más bajos de la Tasa neta de Mineralización de nitrógeno, con respecto a los bosques de pino y encino, lo cual es un indicador de que en éste tipo de bosque el N no está siendo limitante. Finalmente, Nuñez (2000) menciona que la relación C/N es variable en el suelo de acuerdo a las especies y la edad de las plantas que se presentan. Hernández *et al.* (2009) mencionan que para *A. religiosa* un 8.9 % de la biomasa, se concentra en el follaje que es el principal contribuyente de la acumulación de C en el suelo.

Los valores promedio del cociente C/N en suelo fueron de 15 a 26 (fig. 21), siendo menores a los reportados para otros bosques templados en México. En el Parque Nacional de Zoquiapan y en el Iztacihuatl- Popocatepetl se reportaron valores promedio de 39 y 32, respectivamente, mientras que para la Reserva de la Biosfera El Cielo, el valor es de 47 (Corona, 2007; León, 2007).

Almacenes de los nutrientes

En el suelo, para la temporada de lluvias el contenido de Carbono fue de 90,103 Mg ha⁻¹ hasta 113,844 Mg ha⁻¹, siendo el sitio con área basal de 0 m² y el de 2.4 m² los que tuvieron los menores y mayores valores respectivamente, lo cual se ajusta al intervalo de 92 a 216 Mg ha⁻¹ reportado por otros autores para el mismo tipo de bosque (Acosta *et al.*, 2009; Cruz y Etchevers, 2011; Gamboa y Galicia, 2012). Mientras que para la temporada de sequía, el intervalo osciló entre 79,889 y 95,356 siendo el sitio con mayor área basal el que tuvo el valor mas bajo y el de 1.7 m² los mas altos. Lo anterior probablemente se deba a que durante las lluvias existe mayor acumulación de MO por el arrastre. Vela (2012) encontró que el suelo de conservación del D.F., la CRM y en particular los Dinamos presentan muy altos contenidos de carbono orgánico del suelo.

Para la temporada de lluvias los sitios de 2.4 a 1.7 m² de área basal presentaron el menor porcentaje de N con 2 % del total de biomasa, mientras que el resto de los sitios presentaron el 3%. En temporada de secas el porcentaje aumentó hasta 5% en los sitios con áreas menores. El hecho de existir mayor concentración de éste elemento durante la temporada de secas, puede ser debido a que no hubo arrastre por lixiviación. La concentración de Nt para éste trabajo presentó valores entre 2.1 y 5.2 Mg ha⁻¹ superiores a los registrados para otros bosques templados en el país que van de 1.4 a 4.6 Mg ha⁻¹ en Parque Nacional Iztacihuatl- Popocatepetl y Reserva de la Biosfera de El Cielo respectivamente. De acuerdo con estos resultados hay un alto potencial de absorción foliar de N en *Abies religiosa*.

En el caso del mantillo, el Carbono en lluvias tuvo la mayor concentración para el sitio con mayor presencia de árboles (3.1) y el menor valor en el sitio de área basal de 1.0 m². Para secas los sitios con 3.1 y 1.0 m², presentaron los valores más bajos. Para la temporada lluviosa el sitio de área basal 1.7 m² es el que presentó el porcentaje mas alto de nitrógeno (2.07 %). En secas el sitio con menor porcentaje es el que presenta área basal de 1.0 m². Es interesante señalar que en la Cuenca del Río Magdalena se ha encontrado que en el bosque de *Abies religiosa* se acumula mayor cantidad de hojarasca (5 Mg ha⁻¹ año⁻¹) a diferencia del bosque de pino (2.1 Mg ha⁻¹ año⁻¹) (Delgadillo 2011).

Los estudios sobre el cambio en área basal proporcionan la base para conocer las tendencias de los procesos de deforestación, degradación, desertificación y pérdida de la

biodiversidad de una región determinada (Velázquez *et al.*, 2002). El cambio de uso de suelo en un ecosistema no solo afecta su capacidad de almacenar carbono, sino también las propiedades físicas y químicas del suelo. En este contexto, los resultados de este trabajo sobre la proporción C/N y los almacenes de C permiten entender aún más la dinámica de estos nutrientes en el contexto de la biomasa del bosque de oyamel; es un factor que sin duda hay que considerar en la CRM. En los bosques se almacenan grandes cantidades de carbono en las capas de residuos orgánicos sobre el suelo, los cuales deben de ser incluidos en los sistemas nacionales de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (Schulp *et al.*, 2008).

Conclusiones

El presente trabajo cumple con el objetivo general de estimar la proporción C/N del mantillo y del suelo en el bosque de *Abies religiosa* de la cuenca del río Magdalena en sitios con diferente área basal, y cumple con los objetivos particulares de determinar las diferencias en la proporción C/N en el mantillo y en el suelo tanto para la época de lluvias como para la de secas, y estimar los almacenes de nutrientes en el suelo de sitios con diferencias en el área basal del estrato arbóreo.

Contestando las Hipótesis de trabajo:

- Se puede esperar que durante la temporada de lluvias la cantidad de Carbono en el mantillo disminuye por la mayor actividad de la biota y el efecto de mayor porcentaje de humedad, mientras que en el suelo aumentaría por la transferencia luego de la descomposición.

Se concluye que: en temporada de lluvias la concentración de carbono varió ligeramente del promedio sin tener diferencias significativas entre sitios y las diferencias se deben a que la actividad microbiana se dispara mineralizando la materia orgánica y se relaciona con la calidad de la materia orgánica de cada sitio. Se observa un incremento en el suelo en temporada de lluvia con respecto a secas pero se atribuye al probable incremento de biomasa bacteriana.

- Se espera que los sitios con mayor área basal arbórea, aporten mayor cantidad de hojarasca que entra al sistema y por lo tanto de MO, de tal manera que posiblemente presenten relaciones de C/N altas en el mantillo y en el suelo.

Se concluye que: los sitios con mayor área basal sí presentaron valores más altos de C/N en el mantillo (en promedio de 35). Para el sitio con el área basal más baja con 20, indica que en este sitio en particular hay una mayor mineralización de la materia orgánica y que presenta por lo tanto mayor suministro de nitrógeno comparado con los demás sitios. En el suelo ocurre lo mismo, los sitios con mayor área basal presentaron una mayor proporción C/N.

- La relación C/N sería más alta en el suelo y en el mantillo durante lluvias debido al efecto de la descomposición de la materia orgánica, Lo contrario se esperaría ocurriese en la temporada de secas.

Se concluye que: sí se observa una mayor proporción C/N en el mantillo y en el suelo durante lluvias y puede deberse a la mayor acumulación de materia orgánica por el arrastre de la lluvia.

Literatura citada

Aber J. y Melillo J. 2001. Terrestrial ecosystems. Academic Press. Nueva York, USA.

Acosta M., Carrillo F. y Díaz M. 2009. Determinación del carbono total en bosques mixtos de *Pinus patula* Schl. et Cham. Terra Latinoamericana. 27: 105-114.

Aerts R. 1997. Climate, leaf litter chemistry and leaf litter decomposition in terrestrial ecosystems: a triangular relationship. Oikos 79: 439-449.

Alcántara Z. 2009. Producción de CO₂ microbiano en suelos de bosques templados de Oaxaca: Una comparación de sitios húmedos y secos. Tesis de Posgrado en Ciencias Biológicas, UNAM. México. 67 pp.

Álvarez K. 2000. Geografía de la educación ambiental: algunas propuestas de trabajo en el bosque de los dinamos, área de conservación ecológica de la Delegación Magdalena Contreras. Tesis de Licenciatura en Geografía. UNAM, México. 127 pp.

Álvarez S. y Becerra R. 1996. Leaf decomposition in a mexican tropical rain forest. Biotropica 28: 657-666.

Álvarez S. y Rubio A. 2013 Línea base de Carbon en Bosque Mixto de Pino- Encino de la Sierra de Juárez (Oaxaca, México) aplicación del modelo CO₂FIX V.3.2 Revista Chapingo. Serie Ciencias forestales y del Ambiente, vol. 19 (1), enero-abril. Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo, México. P. 125-137.

Arnaldo J., Armado M., Contreras F. y García L. 2009. Fraccionamiento químico de carbono orgánico y su relación con la actividad microbiana, biomasa microbiana y cantidad de ADN en suelos cacaoteros venezolanos. *Society Quim.* 75 (1): 44-53.

Atlas R. y Bartha R. 2002. *Microbial Ecology: Fundamentals and Applications*. Benjamin Cummings, Redwood City, California. 563 pp.

Ávila A. 2002. La vegetación en la cuenca alta del río Magdalena: un enfoque florístico, fitosociológico y estructural. Tesis de Licenciatura en Biología. UNAM. México. 86 pp.

Aviña F. 2007. Estimación del contenido de Carbono en suelo de diferentes clases de cobertura vegetal y uso del suelo en la región Purépecha, Michoacán, México. Tesis de Ingeniero Agrícola Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, UNAM. México. 78 pp.

Baltazar E. 2011. Variación espacio temporal de la meso y macrofauna del mantillo en la Cuenca alta del Río Magdalena, D.F. Tesis de licenciatura, UNAM. México. 70 pp.

Ben H., Hong B., Montoya G., Nelson K., Soto P. y Tipper R. 1995. Community forest management and carbon sequestration: a feasibility study from Chiapas, Mexico. *Interciencia* 20: 409-416.

Bolin B. y Sukumar R. 2000. Global perspective. In: land use, land-use change and forestry, R.T. Watson, I. R. Noble, B. Bolin, N. H. Ravindranath, D. J. Verardo, D. J. Dokken (eds.). Cambridge University Press. Cambridge. UK, P. 23-51.

Blake G. y Hartge K. 1986. Bulk Density In: A. Klute ed. *Methods of Soil Analysis. Parte I Physical and Mineralogical Methods: Agronomy Monograph, 9* ASA y SSSA. Madison. P. 362-375.

Brady N. y Weil R. 2008. *The nature and properties of soils*. Prentice Hall. Columbus, Ohio. 975 pp.

Breitmeyer A., Hall O., Melillo J. y Agren G. 1996. Global change: effects on coniferous forests and grasslands. John Wiley. Chichester, UK.

Breitmeyer A., Berg B., Gower S., y Johnson D. 2009. Carbon budget: temperate coniferous forests. *Terra Latinoamericana* 27 (2): 41-67.

Briceño J., Chaverri F., Alvarado G. y Gadea A. 2002. *Materia orgánica. Características y uso de los insumos en suelos de Costa Rica. Serie de agricultura orgánica No. 1.* UNA. 107 pp.

Brown S. y Lugo A. 1982. The storage and production of organic matter in Tropical Forest and their role in the Global Carbon Cycle. *Biotropica* 14 (3): 161-187.

Buol S., Hole, F. y McCracken R. 2004. *Génesis y Clasificación de Suelos. 4ª Reimpresión.* Septiembre. Trilla. México, D. F. 90 pp.

Campbell A. y Reece B. 2005 *Biología Séptima edición Panamericana.* California. 756 pp.

Castillo C. y Medina M. 2002. *Árboles y arbustos de la Reserva Natural de La Mancha, Veracruz.* INECOL, Xalapa, Ver. 144 pp.

Ceccon E., Olmsted I. y Campo A. 2002 *Vegetación y propiedades del suelo en dos bosques tropicales secos en diferente estado de regeneración en Yucatán* *Agrociencia* 36 (5): 621-631.

Celaya M., García F., Rodríguez J., Castellanos A. 2015. Cambios en el almacenamiento de nitrógeno y agua en el suelo de un matorral desértico transformado a sabana de buffel (*Pennisetum ciliare* (L.) Terra Latinoamericana 33 (1):79-93.

Chapin F., Mooney H., Chapin, M. y Matson P. 2002. Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology. Springer. Estados Unidos. 456 pp.

Chávez G., Fenn M., Gómez A., Vargas J. y Horwath W. 2006. Absorción foliar de nitrógeno por depósito húmedo simulado en follaje nuevo de *Abies religiosa* (H. B. K.) *Schl. et Cham.* Agrociencia 40: 373-381.

Colqué M. y Sánchez V. 2007. Los gases de efecto invernadero: ¿Por qué se produce el Calentamiento Global?, Asociación Civil Labor / Amigos de la Tierra, Perú.

Cook E. y Kairiukstis L. 1990 Methods of dendrochronology: Applications in the environmental sciences. Institute for Applied Systems Analysis, Boston, MA. Dordrecht: Kluwer. P.104-123.

CORENA (Comisión de Recursos Naturales del Distrito Federal). 2001. Estimación del contenido de carbono en la biomasa en el área del suelo de conservación del Distrito Federal. Octubre. Informe Técnico CORENA. 32 pp.

Corona A. 2007. Actividad ureasa del suelo y la dinámica de C y N en bosques templados de México. Tesis de licenciatura en biología, UNAM, México. 90 pp.

Couteaux M., Bottner P. y Berg B. 1995. Litter decomposition, climate and litter quality. Trends in Ecology and Evolution 10 (2): 63-66.

Covaleda S., Gallardo J., García-Oliva F., Kirchmann H., Prat C., Bravo M., y Etchevers J. 2011. Land-use effects on the distribution of soil organic carbon within particle-size fractions of

volcanic soils in the Transmexican Volcanic Belt (Mexico). *Soil Use and Management* 27: 186–194.

Cruz G. y Etchevers J. 2011. Contenidos de carbono orgánico de suelos someros en pinares y abetales de áreas protegidas de México. *Agrociencia* 45(8): 849-862.

Delgadillo E. 2011. Productividad Primaria Neta en los Bosques Templados de la Cuenca del Río Magdalena. Tesis de Maestría, Facultad de Ciencias, UNAM. México. 82 pp.

Donahue R., Miller R, y Shickluna J. 1977. *Soils: an introduction to soils and plant growth*. Englewood Cliffs. New Jersey. Prentice-Hall

Duxbury J., Smith M. y Doran J. 1989. Soil organic matter as a source and a sink of plant nutrients. Coleman D., Oades J. y Guehara G. (Eds.) *Dynamics of Soil organic Matter in Tropical Ecosystems*. University of Hawaii. Honolulu P.33-67.

Etchevers B. 1988. Análisis químico de suelos y plantas. Centro de Edafología. Colegio de Posgraduados, Chapingo, Estado de México. 803 pp.

Etchevers B. 1992. Manual de Métodos para análisis de suelos, plantas, aguas y fertilizantes. Análisis rutinarios en estudios y programas de fertilidad. Laboratorio de Fertilidad de Suelos. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México.

Etchevers B., Monreal C., Acosta M., Hidalgo C., Padilla J. y López R. 2005. Manual para la determinación de Carbono en la parte aérea y subterránea de sistemas de producción en laderas. Proyecto Manejo Sustentable de Laderas. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México. Documento en prensa y de circulación interna.

Fassbender H. y Bornemisza E. 1987. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. San José, Costa Rica.

Fenn M., De Bauer L., Quevedo A. y Rodríguez C. 1999. Nitrogen and sulfur deposition and forest nutrient status in the Valley of México. *Water, Air, and Soil Pollution*, 113: 155-174.

Fenn M., Perea E., Bauer L., Pérez M., Parker D. y Cetina V. 2006. Nutrient status and plant growth effects of forest soils in the basin of Mexico. *Environmental Pollution* 140: 187-189.

Fisher M. 2000. Sistemas de uso de la tierra en los trópicos húmedos y la emisión y secuestro de CO₂. Roma, Italia: Centro Internacional de Agricultura Tropical, FAO.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 1993. Forest resources assessment 1990 tropical countries. *FAO Forestry Paper* 112. FAO, Rome. 59pp.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2000. Sistemas de uso de la tierra en los trópicos húmedos y la emisión y secuestro de CO₂. En: Informe sobre recursos mundiales de suelos, 88. Roma. 98 pp.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2001. Soil Carbon sequestration for improved land management, *World Soil Resources Report*. Editorial FAO, Roma. 193 pp.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) 2002. Captura de Carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. *Informes sobre recursos mundiales de suelos* (96): 61. Roma, Italia.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2010. The area of forest under sustainable management. An analysis of reports to the Global Forest Resources Assessment 2010. *FAO Forest Resources Assessment Working Paper*. Roma, Italia.

Franco S. 2007. Estimación del valor económico del servicio ambiental de captura de carbono en bosques templados del estado de México. La captura de carbono en ecosistemas terrestres iberoamericanos. S. I. F y Q. A. Badajoz (eds.). España. P.149-168.

Fuentes Y. 1994. El suelo y los fertilizantes. 4º edición. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Instituto Nacional de Reforma y Desarrollo Agrario. Madrid, España. 327 pp.

Galeana P., Ordóñez D. y Corona R. 2013 Estimación de contenido de carbono en la cuenca del río Magdalena, México. Madera y Bosques 19: 53-69.

Gamboa A. y Galicia L. 2012. Land-use/cover change effects and carbon controls on volcanic soil profiles in highland temperate forests. Geoderma 170: 390-402.

García E. 1978. Los climas del Valle de México. Colegio de Postgraduados. S.A.R.H., Chapingo, México.

Gómez D., Monterroso R., Tinoco R. y Etchevers B. Almacenes de Carbono en el piso forestal de dos tipos de Bosque Terra Latinoamericana [en línea] 2012, consultado 20 de abril de 2015.

Gómez P. 1966. Estudios botánicos en la región de Misantla. IMERNAR, México, D. F. 173 pp.

Graetz, H. 2008. Suelos y Fertilización. 3º edición. Manuales para educación agropecuaria. Editorial Trilla, SEP. México. 115 pp.

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

Gutiérrez C. 2003. Disponibilidad y dinámica de Nitrógeno en el suelo, bajo especies maderables y leguminosas usadas como sombra en sistemas de café, en la subcuenca del río grande del general. Turrialba, Costa Rica. 78 pp.

Hernández A., Acosta D., Carrillo M. y Etchevers F. 2009. Estimación de biomasa y carbon en un bosque de *Abies religiosa*. *Fitotecnia Mexicana* 32: 233-238.

Houghton R. y Woodwell C. 1989. Global climate change. *Scientific American* 260: 36-40.

Huertiz de L. 2005. La vegetación de la tierra. Volumen 52 de AKAL universitaria. Ediciones AKAL. 263 pp.

Hush B. 2001. Estimación del contenido de carbono de los bosques. En: Simposio internacional, medición y monitoreo de la captura de carbono en ecosistemas forestales. Chile. 9 pp.

INEGI. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, 2003. Síntesis de información geográfica del Estado de México. INEGI, México.

INEGI. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, 2006. Cuaderno estadístico Delegacional. INEGI, México.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2001. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the

Intergovernmental Panel on Climate Change. Technical Summary. Cambridge: WMO-UNEP. Cambridge University Press.

Janish J. y Harmon M. 2002. Successional changes in live and dead wood carbon stores: implications for ecosystem productivity. *Tree Physiology* 22: 77–89.

Kass D. 1998. Fertilidad de suelos. Editorial EUNED, San José, Costa Rica. 272 pp.

Kruk R. y Oldeman R. 1988. The tropical rain forest. A first encounter. Springer-Verlag. Berlin. 345 pp. *Science* 304(5677): 1623-1626.

Kumada, K. 1987. Chemistry of soil organic matter. Japan Scientific Societies Press. Tokio. 240 pp.

Lal R. 2005. Soil erosion and carbon dynamics. *Soil and Tillage Research* 81:137-142.

Lashof D. y Ahuja D. 1990. Relative contributions of greenhouse gas emissions to global warming. *Nature* 344: 529-531.

Law B., Sun O., Campbell J., Van S. y Thornton P. 2003. Changes in carbon storage and fluxes in a chronosequence of ponderosa pine. *Global Change Biology* 9: 510–524.

León H. 2007. Estimación de C en suelos de bosques templados y su relación con la calidad del suelo. Tesis de licenciatura en Biología, UNAM. México 127 pp.

Lilienfein J., Wilcke, W., Ayarza, M., Vilela, L., Carmo, L. y Zech W. 2000. Soil acidification in *Pinus caribea* foresto n Brazilian savanna Oxisols. *Forest Ecology and management* 128: 145-157.

López U., Veldkamp E. y de Koning G. 2005. Soil carbon stabilization in converted tropical pastures and forests depends on soil type. *Soil Science Society of America Journal* 69 (4):1110-1117.

Masera O. y Fuentes G. 2006. Introducción. *In: La Bioenergía en México, un catalizador del desarrollo sustentable*. Omar Masera (Ed.). Comisión Nacional Forestal. Mundi-Prensa, México. P. 1-6.

Melillo J., Hall D. y Agren G. 1996. Executive summary. *En: Global change: effects on coniferous forests and grasslands*. John Wiley New York, USA. P. 1-16.

Montagnini F. y Nair P. 2004. Carbon sequestration: an underexploited environmental benefit of agroforestry systems. *Agroforestry Systems* 61: 281-295.

Montaño N. 2008. Efecto del Carbono Orgánico sobre la disponibilidad de fosforo y nitrógeno en el suelo de un ecosistema tropical estacional mexicano. Tesis de Doctorado UNAM. México. 128 pp.

Moreno D. 2006. Composición y abundancia de la meso y macrofauna edáfica asociada a la descomposición del tejido leñoso de dos especies arbóreas de una selva tropical húmeda. Tesis de licenciatura. UNAM, México. 72 pp.

Murray G. 2011. Flujos de N y P en la hojarasca de una Selva Baja Caducifolia en Chamela, Jalisco. Tesis de maestría, UNAM. México. 60 pp.

Murty D., Kirschbaum M., McMurtrie R., y McGilvray H. 2002. Does conversion of forest to agricultural land change soil carbon and nitrogen? A review of the literature, *Global Change Biology* 8: 105-123.

Nava M. 2003. Los bosques de la Cuenca del río Magdalena, D. F., México. Un estudio de vegetación y fitodiversidad. Tesis de licenciatura en Biología. UNAM, México. 64 pp.

Nava M. 2005. Carbono almacenado como servicio ecosistémico y criterios de restauración en el bosque de *Abies religiosa* de la cuenca del río Magdalena, D.F., México. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias. UNAM. México. 70 pp.

Navarro B. y Navarro G. 2003. Química Agrícola. Segunda edición. Mundi-Prensa México, D.F. 432 pp.

Nieder R. y Benbi D. 2008. Carbon and Nitrogen in the Terrestrial Environment. 74. Springer Verlag. 432 pp.

Noble I. Implications of different and generic issues. En: Watson, R.T. y colaboradores (eds.) IPCC Special Report Land Use, Land-Use Change and Forestry. P. 53-126.

Núñez S. 2000 Fundamentos de la edafología, San José. Reino Unido 188 pp.

Olgúin M. 2001. Incorporación de la captura de carbono como propuesta de manejo forestal integral: estudio de caso en una comunidad de la meseta Purépecha, México. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias UNAM. México. 73 pp.

Oliva M. y García O. 1998. Un nuevo campo de acción en la química biológica parte I. Generalidades sobre el cambio global. Educación química. P. 136-142.

Ordoñez B. y Masera O. 2001. Captura de Carbono ante el Cambio Climático Madera y Bosques 7 (001):3-12.

Ortiz P. 1995. Avifauna del centro de investigaciones costeras La mancha, Veracruz, México. Instituto de Ecología, A.C., Xalapa, Veracruz. 32 pp.

Otegui O., Zamalvide J., Perdomo C., Goyenola R y Cerveñanasky A. 2002. Momento de aplicación de nitrógeno: efecto en eficiencia de uso del fertilizante, rendimiento y concentración proteica en grano de cebada cervecera en Uruguay. *Terra* 20: 71-80.

Paul E. 2007. *Soil microbiology, ecology and biochemistry*. Tercera edición. Academic Press, Oxford. 532 pp.

Parton W., Schimel, D., Cole, C. y Ojima D. 1987 Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grasslands. *Soil Science Society of America*: 1173-1179.

Parra M., Fernández E., Navarro C. y Arquero O. 2003. *Los suelos y la fertilización del olivar cultivado en Zonas Calcáreas*, Mundi Prensa, primera edición. 256 pp.

Pennington T. y Sarukhán J. 2005. *Árboles tropicales de México*. UNAM y Fondo de Cultura Económica. México, D. F. 523 pp.

Pérez J. 2006. *Estimación del contenido de Carbono en mantillo de diferentes clases de cobertura vegetal y uso del suelo en la región Purépecha, Michoacán, México*. Tesis de Licenciatura en Biología. UNAM, México. 54 pp.

Philippot L. y Germon J. 2005. Contribution of bacterial to initial input and cycling of nitrogen in soils. En: Buscot F. y Varma, A. (eds.). *Microorganisms in soils: roles in genesis and functions*, Springer, Nueva York. P. 159-176.

Plaster E. 2000. *La ciencia del suelo y su manejo*. Editorial Paraninfo. Madrid 419 pp.

Porta J., López A. y Roquero C. 2003. Edafología. Para la agricultura y el medio ambiente. Ediciones Mundi-Prensa. 3a edición. Madrid. 960 pp.

Reyes J. 1996. Fundamentos teórico-prácticos de temas selectos de la ciencia del suelo, Parte I. UAM, Unidad Iztapalapa. México. 257 pp.

Robert M. 2001. Soil carbón sequestration for improved land management en www.fao.org/agl/agll/docs/wsr96e.pdf (Consultado el 14 de abril de 2015).

Robertson G. y Groffman P. 2007. Nitrogen transformations. En: Paul, E. (Ed.), Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry. Academic Press San Diego. P. 245-283.

Rocha A. y Ramírez N. 2009. Producción y descomposición de hojarasca en diferentes condiciones sucesionales del bosque de pino-encino en Chiapas, México. Boletín de la Sociedad Botánica de México, (84) Junio 2009. P. 1-12.

Ruiz L. 2012. Cambios del uso del uso 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 Ingeniero Agrícola, Universidad Veracruzana, México. 43 pp.

Rzedowski J. 1978. Vegetación de México. Limusa. México, D.F. 432 pp.

Rzedowski, J. 2006. Vegetación de México. Primer edición digital. CONABIO México P.169-210.

Sabine C., Heimann M., Artxo P. y Valentini R. 2004. Current status and past trends of the global carbon cycle. En: C.B. Field y M.R. Raupach (eds.) Integrating humans, climate and the natural world. Island Press, W.C.

Santibáñez G. 2009. Composición y estructura del bosque de *Abies religiosa* en función de la heterogeneidad ambiental y determinación de su grado de conservación en la Cuenca del río Magdalena, México, D. F. Tesis de Maestría en Ciencias Biológicas. UNAM, México. 134 pp.

Sarukhán J. 1968. Los tipos de vegetación arbórea de la zona cálido-húmeda de México. En: Pennington, T. D. y Sarukhán, J. (eds.). Manual para la identificación de los árboles tropicales de México. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales-FAO. México, D.F. P. 3-46.

Saynes V., Hidalgo C., Etchevers, J. y Campo J. 2005. Soil C and N dynamics in primary and secondary seasonally dry tropical forests in Mexico. Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente 29:282-289.

Schimel D. 1995. Terrestrial Ecosystems and the Carbon cycle: Global Change Biology 1:77-91.

Schmidt, I., Jonasson S. y Michelsen A. 1999. Mineralization and microbial immobilization of N and P in arctic soils in relation to seasons, temperature and nutrient amendment. Applied Soil Ecology 11:147-160.

Schneider S. 1989. The greenhouse effect: science and policy. Science 243: 271-281.

Schulp C., Nabuurs G., Verburg P. y De Wall R. 2008. Effect of tree species on carbon stocks in forest floor and mineral soil and implications for soil carbon inventories. *Forest Ecology and Management* 256: 482-490.

Segura C., Sánchez G., Ortiz S. y Gutiérrez C. 2005. Carbono orgánico de los suelos de México. *Tierra Latinoamericana* 1: 21-27.

SEMARNAT. 2000 Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000. Especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de los suelos, estudio, muestreo y análisis Diario oficial 29 de enero de 2010. Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales.

SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2001. México II Comunicación Nacional ante la convención Marco de las Naciones Unidas sobre cambio Climático. Comité Intersecretarial sobre Cambio Climático. Instituto Nacional de Ecología (INE). SEMARNAT. México, D. F.

Shaver G. y Aber J. 1996. Carbon and nutrient allocation in terrestrial ecosystems. En: J. Melillo y A. Breymeyer (Eds.) *Global change: effects on coniferous forests and grasslands*. John Wiley. New York, NY, USA. 459 pp.

Shimadzu, 2011. Catalogo: Total Organic Carbon Analyzer TOC-L (C391-E079A), Japan. 16 pp.

Siebe, C. 2006. Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo. Universidad Autónoma Chapingo. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C., Publicación Especial 4: 57 pp.

Silva A. 2004. La materia orgánica del suelo. En: <http://www.fagro.edu.uy/~edafologia/curso/Material%20de%20lectura/Materia%20Organica/organica.pdf>. (Consultado el 21 de abril de 2015).

Smith D. y Johnson L. 2003. Expansion of *Juniperus virginiana* L. in the Great Plains: changes in soil organic carbon dynamics, *Global Biogeochemical Cycles*, 17(2):1062.

Stanier Y., Ingraham J., Wheelis M. y Painter P. 2005 *Microbiología: segunda edición*. Editorial Reverté. España. 768 pp.

Stevenson F. y Cole M. 1999 *Cycles of soil: Carbon, Nitrogen, Phosphorus, Sulphur Micronutrients*. Wiley y Sons. Estados Unidos. 448 pp.

Swift R. y Posner A. 1972, The Distribution and Extraction of soil nitrogen as a function of soil particle size. *Soil Biology Biochemistry* 4:181-186.

Valenzuela H. 2001. Estimación de secuestro de carbono en bosques naturales de oyamel en el sur del Distrito Federal. Chapingo, Estado de México. Tesis de Licenciatura. 60 pp.

Valverde T., Meave J., Carabias, J. y Cano-Santana Z. 2005. *Ecología y medio ambiente* Pearson Educación. México. 240 pp.

Vela C., López B. y Rodríguez G. 2012. Niveles de carbono orgánico total en el Suelo de Conservación del Distrito Federal, centro de México. *Investigación Geográfica* 77: 18-30.

Velázquez M. 2012. Efecto del cambio en la cobertura vegetal sobre la captura de carbono en suelo en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, Estado de México y Michoacán. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias. UNAM. 107 pp.

Vergara S., Etchevers, J. y Padilla J. 2005. La fertilidad de los suelos de ladera de la Sierra Norte de Oaxaca, México. *Agrociencia* 39: 259-266.

Waring R. y Schlesinger W. 1985. *Forest Ecosystems: concepts and management* Academia Press. Inc. USA. 338 pp.

White R. 1997 *Principles and practice of soil science*. Blackwell Science Reino Unido 438 pp.

Whitmore A. y Handayanto E. 1997. Simulating the mineralization of N from crop residues in relation to residue quality. En: *Driven by Nature: Plant Litter Quality and Decomposition*.