



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

**MAESTRÍA EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA
PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE**

**CONTENIDO DE CARBONO EN ECOSISTEMAS DEL
CERRO TLÁLOC, TEXCOCO, MÉXICO**

TESIS



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

QUE COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE
**MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA
PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE**

PRESENTA:

ROSALÍA VERÓNICA PÉREZ MARTÍNEZ

Chapingo, Estado de México, julio 2011



**CONTENIDO DE CARBONO EN ECOSISTEMAS
DEL CERRO TLÁLOC, TEXCOCO, MÉXICO**

Tesis realizada por Rosalía Verónica Pérez Martínez bajo la dirección del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROFORESTERIA PARA EL DESARROLLO
SOSTENIBLE**

DIRECTOR:



Dr. Joel Pérez Nieto

CO-DIRECTOR:



Dr. Juan José Almaraz Suárez

ASESOR



Dr. Laksmi Reddiar Krishnamurthy

Chapingo, Estado de México, Julio 2011

AGRADECIMIENTOS

A **Dios** por darme la oportunidad de desarrollarme en mi vida, por su grande amor y misericordia.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología** (CONACyT) por su apoyo financiero para el desarrollo de investigación. A la **Universidad Autónoma Chapingo** por darme la oportunidad de desarrollarme y tener herramientas de conocimiento para servir a la sociedad. A la coordinación académica de **Agroforestería para el Desarrollo Sostenible** por el apoyo en la gestión correspondiente en el proyecto de investigación.

Al comité asesor: **Dr. Juan José Almaraz Suarez** por el completo apoyo en el planteamiento, desarrollo, financiamiento, trabajo en campo y en laboratorio en el proyecto de investigación, así como su constante asesoría y correcciones asertivas, como de la colaboración de su equipo en todo el proceso. Al **Dr. Joel Pérez Nieto** por la asesoría y gestiones correspondientes para poder trabajar las muestras en el laboratorio de Ecología del Depto. de Fitotecnia. Al **Dr. L. R. Krishnamurty** por su apoyo en la culminación del proyecto.

Al M.C. en Agroforestería **Francisco Javier Hernández Archundia** por su apoyo, asesoría asertiva para el éxito de la investigación, así como su amistad, amor y paciencia.

A las personas que me apoyaron en la realización de éste proyecto en sus diferentes etapas y que sin su participación no se habría llevado a cabo de manera exitosa: M.C. Violeta Carrasco y Laura Bolaños, los señores ejidatarios de San Pablo Ixayoc, Bonifacio, Genaro y Andrés el encargado del laboratorio Bio. José Cutberto Vázquez Rodríguez, laboratoristas Víctor Sánchez García y Gumaro Reyes Meraz Urban.

DEDICATORIA

Con amor y afecto a mi padre Sergio Pérez Santiago, por ser un medio de mi Dios para guiarme con sabiduría y fortaleza para ser lo mejor que puedo ser.

A todos los miembros de mi familia: Rita Pérez Martínez, Soledad Ángela Pérez Martínez, Alicia Pérez Martínez, Gabriel Sergio Pérez Martínez, Wendy Arai Soria Pérez, Mónica Velázquez Pérez, Sergio Manuel Pérez Magaña, Emyli y Gael, que han sido una gran inspiración en mi vida, por compartir momentos alegres y difíciles de mi vida.

A mi estimada amiga Filomena Ruíz, Laura Rivera, Elia López, Nadia Lugo, regalo de Dios para hacerme comprender un poco más el calibre del amor de mi Padre Celestial. A la familia Hernández Archundia, por su cariño y aceptación.

A las familias Doro y Daniel Case, Lilia y Teodoro Gómez Hernández, extranjeros de otra talla, tan insólitos aquí, forasteros con nostalgia del hogar, en sus frentes brilla el sol, en sus manos siempre hay pan y en sus labios no hay engaño ni traición. Que con cariño me han guiado para un crecimiento y desarrollo personal y profesionalista.

A mi esposo, tesoro que yo siempre había deseado, Dios te diseñó con sentido y con ingenio para compensar este corazón bohemio, para seguir en la aventura de la vida.

Sinceramente, muchas gracias.

Verónica Pérez

*Con Dios está la sabiduría y el poder,
suyo es el consejo y la inteligencia.
(Job 12:13)*

DATOS BIOGRÁFICOS

Verónica Pérez Martínez, nace un tres de septiembre, en la localidad de Oaxaca de Juárez, Oaxaca. Su padre tuvo gran influencia en el amor a la ciencia y al campo, razón por la cual al terminar sus estudios básicos con alto aprovechamiento, en el 2000 participo en la selección de la más importante escuela agronomía de México, la Universidad Autónoma Chapingo, misma en que realizo sus estudios en Ingeniero Agrónomo especialista en Parasitología Agrícola, con el fin de conocer y dominar técnicas alternativas como el control biológico y producción orgánica, durante su desarrollo profesional realiza su servicio en la organización cafetalera “Grelpa de Oaxaca S.S.S.”, donde colaboro con el personal en la campaña de la broca del café, bajo un esquema de control biológico y preventivo. Egresa en el 2005 satisfactoriamente, desarrollando la investigación de “Control biológico de la Broca del Café (*Hypothenemus hampei*)” y participa en el Congreso Nacional de Agroforestería para el Desarrollo (PNUMA), donde enfoca su perspectiva profesionista a nuevas alternativa sostenible y orgánica.

En agosto 2007 participa en el “seminario y certificación de aprobación en el manejo y control de procesos de producción y clasificación de productos orgánicos JAS. Organic Crop Improvement Association Internacional, Inc., y en diciembre 2008 en el seminario nacional “Situación actual, restos y perspectivas de la operación orgánica, certificación e insumos”. Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentarias. Colegio de Postgraduados, en Oaxaca. En el 2009 a 2010 cursa el posgrado en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible UACH, donde culmina de manera satisfactoria, con un promedio de 94, y junto con su comité asesor desarrollaron el tema de investigación ” Contenido de carbono en ecosistemas en el cerro Tláloc, Texcoco, México.”

CONTENIDO DE CARBONO EN ECOSISTEMAS DEL CERRO TLÁLOC, TEXCOCO, MÉXICO

CARBON STOCKS IN ECOSYSTEMS OF MOUNT TLALOC, TEXCOCO, MÉXICO

Pérez-Martínez R. V.; Almaraz-Suárez J. J.; Pérez-Nieto J.

RESUMEN

Para contribuir a la mitigación del cambio climático por medio de la captura de carbono es indispensable contar con información básica del contenido de carbono y mejorar su estimación en los diferentes almacenes que puede tener un ecosistema. Por tal motivo este estudio se realizó en ecosistemas ubicados en la falda oeste del cerro Tláloc, Texcoco, México.

Los sistemas evaluados fueron ocho: zacatal alpino, bosque de pino, oyamel, cedro y encino, áreas reforestadas de 10 y 30 años y de uso agrícola. Se determinó el carbono orgánico en árboles mediante ecuaciones alométricas. Mientras que en arbustos, hierbas, hojarasca, mantillo y raíces finas se determinó en base a la biomasa. El carbono del suelo (COS) se cuantificó en tres profundidades a través de un analizador de carbono PerkinElmer® (Serie II). Así también se midió la textura, pH, capacidad de intercambio catiónico (CIC), nitrógeno (N) y fósforo (P) en el suelo.

El mayor contenido de carbono se encontró en bosque de oyamel, cedro y pino con 300 a 334 Mg C ha⁻¹, siendo la vegetación la que aporta más del 53%; sólo en zacatal alpino y bosque de pino el suelo aportó el 70% del carbono. Se encontró una asociación del 56% entre la densidad aparente y COS, y de 70% entre CIC y COS. El cambio de uso de suelo en Ag causó una pérdida del 27 a 32 % de COS. Se concluye que el área de estudio es un importante sumidero de carbono tanto en la vegetación como el suelo, con gran potencial de incrementar la tasa de acumulación mediante un aprovechamiento sustentable.

Palabras claves: contenido de carbono, ecosistemas, almacenes de carbono.

ABSTRACT

To contribute to climate change mitigation by carbon sequestration, it is essential to have basic information on carbon content and improve estimation of the various carbon deposits within an ecosystem. Therefore, this study was carried out on ecosystems located on the western slope of Mount Tláloc, Texcoco, México.

Eight systems were evaluated: alpine grassland, pine, Mexican fir, cedar and oak forest, reforested areas of 10 and 30 years and agricultural land. Organic carbon was determined in trees using allometric equations. In shrubs, grasses, litter, humus and fine roots, it was determined on the basis of dry biomass. The soil carbon (SOC) in three depths was determined by a PerkinElmer® (Series II) carbon analyzer. Also, texture, pH, cation exchange capacity (CEC), nitrogen (N) and phosphorus (P) in soil were analyzed.

The highest carbon content was found in Mexican fir, cedar y pine forest with 300 to 334 Mg C ha⁻¹, where vegetation provided more than 53% of this. Only in the alpine grassland and pine forest did the soil contribute 99% y 70%. Bulk density and SOC were highly associated (56%), and also were CEC and SOC (70%). Land-use change in Ag caused 27 to 32% loss in SOC. We conclude that the study area is an important carbon sink in both vegetation and soil, with great potential to increase the rate of accumulation through sustainable utilization.

Key words: carbon content, ecosystems, carbon deposits

CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	OBJETIVOS.....	3
1.2	HIPÓTESIS.....	3
2	REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
2.1	EL CARBONO EN LOS ECOSISTEMAS TERRESTRES	4
2.1.1	Carbono en ecosistemas de México	5
2.1.2	Carbono en los bosques.....	6
2.2	CARBONO EN LA BIOMASA	7
2.2.1	Biomasa aérea	8
2.2.2	Biomasa subterránea	10
2.3	CARBONO EN EL SUELO	10
2.3.1	Material orgánico y su relación carbono/nitrógeno.....	12
2.3.2	Uso de la tierra y su relación con el ciclo del carbono	13
2.4	CARBONO EN LOS SISTEMAS AGROFORESTALES	14
3	MATERIALES Y MÉTODOS.....	18
3.1	DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	18
3.1.1	Localización.....	18
3.1.2	Clima	19
3.1.3	Vegetación	19
3.1.4	Geomorfología.....	21
3.1.5	Suelo	21
3.2	ESTABLECIMIENTO DE LOS SITIOS.....	22
3.2.1	Sitios de muestreo.....	22

3.3	MUESTREO Y ESTIMACIÓN DE CARBONO	23
3.3.1	Estrato arbóreo.....	23
3.3.2	Estrato arbustivo, herbáceo, hojarasca y mantillo	24
3.3.3	Suelo	25
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	28
4.1	CARBONO EN BIOMASA AÉREA.....	29
4.2	CARBONO SOBRE EL SUELO	32
4.2.1	Material en descomposición y su relación carbono/nitrógeno	34
4.3	CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO (COS).....	35
4.3.1	Carbono orgánico en el perfil del suelo.....	36
4.3.2	Carbono y características del suelo	38
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	43
5.1	CONCLUSIONES	43
5.2	RECOMENDACIONES	43
6	LITERATURA CITADA	45

INDICE DE CUADROS

Cuadro

1. Ecosistemas y uso del suelo del área de estudio.....	22
2. Ecuaciones alométricas para el cálculo de biomasa aérea en kg árbol ⁻¹	24
3. Factor carbono para la determinación de biomasa radical.....	24
4. Contenido de carbono en la vegetación en el Cerro Tlálloc.....	29
5. Relación entre el desarrollo fustal y el contenido de carbono.....	31
6. Contenido de carbono en materiales orgánicos sobre el suelo de los ecosistemas del Cerro Tlálloc.....	33
7. Contenido de carbono del suelo más raíces finas en un perfil de 0-30cm.....	35

INDICE DE FIGURAS

Figura

1. Localización del área de estudio.....	18
2. Sitios de muestreo en el área de estudio (•).....	19
3. Vegetación y uso de suelo en el área de estudio.....	20
4. a) Esquema del sitio de muestreo y subunidades. b) Material orgánico y perfil de suelo muestreado en las subunidades.....	23
5. Contenido total de carbono en los ecosistemas del Cerro Tlálloc.....	28
6. Carbono en biomasa forestal en ecosistemas del Cerro Tlálloc.....	30
7. Contenido de carbono en biomasa arbustiva de dos ecosistemas; bosque de encino (BE) y reforestado de 30 años (R2).....	32
8. Relación carbono/nitrógeno de hojarasca y mantillo en los ecosistemas.....	34
9. Carbono orgánico de los perfiles del suelo en ecosistemas del Cerro Tlálloc.....	37
10. Contenido de suelo, raíces y piedras en la densidad aparente (Dap) y la densidad aparente ajustada (Dap ajustada) en los ecosistemas del Cerro Tlálloc.....	38
11. Relación de la densidad aparente y el carbono orgánico del suelo (COS) de 0-30cm, en los ecosistemas del Cerro Tlálloc.....	39
12. Relación de pH y el carbono orgánico del suelo (COS) de 0-30cm, en los ecosistemas del Cerro Tlálloc.....	40
13. Relación de capacidad de intercambio catiónico (CIC) y el carbono orgánico del suelo (COS) de 0-30cm, en los ecosistemas del Cerro Tlálloc.....	41
14. Relación nitrógeno (N) y carbono orgánico del suelo (COS) de 0-30cm, en los ecosistemas del Cerro Tlálloc.....	42
15. Relación fósforo (P) y carbono orgánico del suelo (COS) de 0-30cm, en los ecosistemas del Cerro Tlálloc.....	42

1 INTRODUCCIÓN

El cambio climático es en la actualidad uno de los fenómenos atmosféricos más importantes a nivel mundial, debido principalmente, al aumento del consumo de combustibles fósiles, los cuales al ser utilizados liberan gases de efecto de invernadero (GEI) como dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), clorofluorocarbonados (CFC1s), óxidos de nitrógeno (NO_x) y metano (CH_4), principalmente, siendo el CO_2 uno de los GEI más importantes por las grandes cantidades que se emiten (Ordóñez y Masera, 2001).

Entre 1970 y 2004, las emisiones anuales de CO_2 han aumentado en aproximadamente un 80%, pasando de 21 a 38 gigatoneladas (Gt), y en 2004 representaban un 77% de las emisiones totales de GEI antropogénicos. La concentración de CO_2 en la atmósfera aumentó, pasando de un valor preindustrial de aproximadamente 280 partes por millón (ppm) a 379 ppm en 2005 sujeta a variabilidad interanual (IPCC, 2007).

La mitigación de la emisión de GEI a través de la captura de carbono por sistemas naturales se encuentra relacionada con el estudio del valor de las funciones ecológicas de éstos sistemas (Vargas-Mena y Yáñez-Sandoval, 2004). Aún cuando el concepto del ciclo del carbono en la naturaleza y la capacidad de absorción del suelo y los océanos ha sido conocido durante largo tiempo, no fue sino hasta 1976 que se propuso por primera vez la idea de los bosques como “almacenadores” de las emisiones de combustibles fósiles (WRI, 2001).

Razón por la cual los programas de captura de carbono en bosques son instrumentos con enorme potencial para contribuir a la transición hacia el desarrollo sustentable (Vargas-Mena y Yáñez-Sandoval, 2004). Sin embargo los flujos anuales de CO_2 varían de un año a otro, haciendo difícil ajustar la captura de carbono en un proyecto forestal particular a una fuente industrial de emisiones (Rojo-Martínez *et al.*, 2003). Información que en México no se encuentra detallada sobre los almacenes de carbono por tipo de ecosistema y uso de suelo, así como los flujos netos de carbono derivado de los patrones de cambio de uso de suelo a

nivel regional. (Hughes *et al.*, 1999; Hughes *et al.*, 2000; Ahedo, 2000). Mismo que la Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) de México en su programa especial de cambio climático (PECC) en el capítulo de investigación y desarrollo tecnológico propone en su objetivo fortalecer la investigación científica y el conocimiento sobre el ciclo del carbono. Con una meta en 2010 de realizar y publicar las estimaciones de coeficiente de contenido de carbono y de capacidad de captura de carbono de las principales eco-regiones (marinas, forestales y agrícolas) del país.

La importancia del presente estudio con respecto a la mitigación del cambio climático, es contar con la información básica sobre el contenido de carbono en los diferentes depósitos o almacenes que pueden tener los ecosistemas y agroecosistemas ubicados en el cerro del Tláloc, esto es, a nivel regional, así como también valorar la importancia de la metodología de su estimación, teniendo el potencial de gestionar proyectos específicos de aprovechamiento, servicios ambientales y el diseño adecuado de sistemas agroforestales, para la seguridad alimentaria.

1.1 OBJETIVOS

a) Objetivo general

Determinar el contenido de carbono orgánico en los almacenes de árboles, arbustos, hierbas, mantillo, raíces y suelo en ecosistemas a lo largo de un gradiente altitudinal en la falda oeste del cerro Tláloc.

b) Objetivos específicos

1. Determinar la relación entre los tipos de vegetación y el carbono orgánico total almacenado en los ecosistemas del cerro del Tláloc.
2. Describir la relación entre materiales en diferentes grados de descomposición (hojarasca nueva, hojarasca, mantillo y leña) y el carbono orgánico total en los ecosistemas.
3. Explicar las relaciones entre las características físicas (densidad aparente y textura) y el almacenamiento de carbono orgánico total.
4. Estimar las relaciones entre las características químicas (pH, nitrógeno inorgánico, fósforo y capacidad de intercambio catiónico) y el almacenamiento de carbono orgánico del suelo.

1.2 HIPÓTESIS

1. La productividad del bosque y la calidad de los residuos orgánicos contribuyen en forma significativa en la acumulación de carbono de los ecosistemas en estudio.
2. El contenido de carbono es mayor en el perfil de 0 a 20 cm, por la aportación de los materiales orgánicos que los ecosistemas aportan que son degradados e incorporado al suelo.
3. La presencia de carbono orgánico en el suelo determina un mayor potencial de capacidad de intercambio catiónico del suelo de los ecosistemas.

2 REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 EL CARBONO EN LOS ECOSISTEMAS TERRESTRES

Los bosques y selvas capturan, almacenan y liberan carbono como resultado de los procesos fotosintéticos, de respiración y de degradación de materia orgánica. El saldo es una captura neta positiva cuyo monto depende del manejo que se le dé a la cobertura vegetal, así como de la edad, distribución de tamaños, estructura y composición de ésta. Este servicio ambiental que proveen bosques o selvas como secuestradores de carbono (sumideros o almacenes) permite equilibrar la concentración de este elemento, misma que se ve incrementada debido a las emisiones que son producto de la actividad humana.

Los principales almacenes de carbono orgánico en los ecosistemas forestales son el suelo, la vegetación y el mantillo. La vegetación es la encargada de incorporar el carbono atmosférico al ciclo biológico por medio de la fotosíntesis (Ordóñez y Masera, 2001). Campos *et al.*, (1995) estima que la biosfera terrestre contiene aproximadamente 560 Pg (Pg = petagramos = 10^{15} g) de carbono en biomasa y mantillo, y 1100 a 1400 Pg de C en el suelo.

El mantillo es el material orgánico, el cual se origina de las estructuras vegetales como hojas, ramas y troncos depositados en el suelo, que se encuentran en descomposición y en proceso de humificación. El CO es fijado por microorganismos y animales, es otra forma de disminuir la cantidad de bióxido de carbono disponible, aunque cuantitativamente menos importante que la fijación de carbono que realizan las plantas y el intercambio gaseoso de los océanos (Ordóñez-Díaz, 2008).

Los bosques templados y tropicales capturan y conservan más carbono que cualquier otro sistema terrestre y participan con el 90% del flujo anual de CO entre la atmósfera y el suelo (Apps *et al.*, 1993; Brown *et al.*, 1993; Dixon *et al.* 1994). Dicho flujo de carbono está en función de la concentración de este elemento en las plantas, la biomasa, los distintos tipos de uso de suelo, la profundidad del suelo y la densidad aparente (Woomer y Palm, 1998).

Los bosques, al igual que otros ecosistemas, se ven afectados por el cambio climático, ya sea por un aumento del nivel del mar que amenaza los bosques costeros o por cambios en los patrones de temperatura y precipitaciones. En algunos lugares, los impactos pueden ser negativos, mientras que en otros puede ser positivo. Sin embargo, los bosques también influyen en el clima y el proceso de cambio climático. Almacenan carbono en la madera, las hojas y el suelo y lo liberan a la atmósfera cuando se queman, por ejemplo, durante los incendios forestales o la tala de bosques (FAO ,2006).

El Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en ingles) ha señalado la necesidad de mejorar las estimaciones del almacenamiento de carbono en todo tipo de ecosistemas. Esto incluye el carbono almacenado en la biomasa por encima y por debajo de tierra, considerando el carbono de la materia orgánica humificada de los suelos (Peña-Ramírez *et al.*, 2009), siendo que en la actualidad hay diversos estudios con diferentes metodologías y a diferentes escalas que complican la comparación y la proyección a nivel regional, sin embargo son indicadores aceptables para el planteamiento y evaluación de costos de estrategias para la mitigación del cambio climático.

2.1.1 Carbono en ecosistemas de México

El carbono (C) es un elemento clave en el desarrollo del componente orgánico del suelo y en la estructura y función de los ecosistemas, debido a que no sólo determina los cambios en su almacenamiento sino también controla la productividad de estos ecosistemas (Janish y Harmon, 2002; Law *et al.*, 2003).

De acuerdo con la superficie que ocupa cada región ecológica, los suelos de los bosques de coníferas y encinos, de las selvas húmedas y de las selvas secas aportan 70% del carbono orgánico edáfico de México (Segura-Castruita *et al.*, 2005).

De Jong *et al.* (1999), estimaron que el contenido de carbono en ecosistemas forestales de clima templado, incluyendo zonas de pastizal y de cultivo en las tierras altas de Chiapas es de 147 a 504 tonelada de carbono por hectárea (Mg de

C ha⁻¹). Segura-Castruita *et al.* (2005), reportan que suelos de México tienen, en promedio, 1.8% de C y 3.1% de materia orgánica, lo que representa un contenido total de 10.5 Pg de C en la capa superficial (de 0 a 20 cm de profundidad).

En un análisis preliminar para México, Bellón *et al.* (1993) asumieron que manteniendo las áreas naturales protegidas, realizando un manejo de los bosques de manera sustentable en las áreas comerciales, reforestando las áreas forestales degradadas se podía llegar a niveles de captura de carbono en dichas zonas del orden de 3,500 a 5,400 millones de toneladas en un periodo de 100 años, lo que equivale a una captura anual, bajo este escenario hipotético, de 35-54 millones de toneladas de carbono por año.

Trexler y Haugen (1995) estimaron que en México, adicionalmente a los datos de Bellón *et al.* (1993) existe alrededor de un millón de hectáreas potenciales para el desarrollo de plantaciones forestales, con un potencial de captura entre 30.7-85.5 millones de toneladas. Aún más, dichos autores estiman que existen en el país alrededor de 30 millones de hectáreas de áreas arboladas con regeneración natural con posibilidades de capturar entre 1,038 y 3,090 millones de toneladas de carbono.

2.1.2 Carbono en los bosques

Los bosques no sólo proporcionan alimentos y materias primas, sino también la prestación de servicios ambientales que son cruciales para el funcionamiento de los ecosistemas y por tanto, para el bienestar de la humanidad (Peña-Ramírez *et al.*, 2009). Desde el punto de vista de la fijación de C, la producción forestal puede ser un proceso de múltiples entradas y salidas, donde la producción es de dos servicios principales: madera y C orgánico. Este proceso de producción es acoplado, es decir, una de las salidas no puede producirse sin simultáneamente producirse la otra hasta cierto nivel (Hoen y Soldberg, 1994).

Las masas forestales desempeñan un papel primordial en el ciclo del C porque almacenan grandes cantidades de éste en la vegetación y en el suelo, lo intercambian con la atmósfera a través de la fotosíntesis y la respiración, son

fuentes de CO₂ atmosférico cuando son perturbados por causas humanas o naturales (incendios, deforestación, entre otros) y se convierten en sumideros durante el abandono de las tierras y se regeneran naturalmente tras la perturbación, además pueden ser manejados para no alterar su papel en el ciclo global del C (Brown, 1997).

La evaluación de las funciones de los bosques como sumideros de carbono y como fuentes de emisiones de CO₂ se ha convertido en una de las claves para entender y modificar el ciclo global del carbono; las evaluaciones de recursos forestales mundiales por organismos científicos tienen el potencial de contribuir a fundamentar o estimar la magnitud de las reservas y flujos de carbono (FAO, 2006).

En condiciones naturales el contenido de materia orgánica del suelo es relativamente constante, pero el equilibrio se ve alterado cuando los bosques son talados o cuando los bosques y praderas se convierten en tierras de cultivo. Si los bosques son transformados en tierras de cultivo, los sumideros de carbono del suelo seguirán disminuyendo como consecuencia de los cambios en la calidad y cantidad de aportes de materia orgánica al suelo y al aumento de las tasas de oxidación causada por la labranza (Anderson, 1991; Smith y Almaraz, 2004).

2.2 CARBONO EN LA BIOMASA

El potencial de captura de carbono está ligado al potencial de formación de biomasa. De ahí que las regiones donde resultan factibles altos rendimientos de biomasa sean las regiones de mayor potencial de captura de carbono. Para México estas áreas están localizadas a lo largo de las llanuras costeras y en el sur y sureste del país, donde se registran los mayores rendimientos de biomasa. En este contexto, los mejores lugares para ubicar proyectos de captura de carbono son aquellos que tienen el mayor potencial para el desarrollo de plantaciones o sistema de cultivo de alto rendimiento en producción de biomasa (Masera, 1995)

El carbono en la vegetación es la suma del carbono contenido en la biomasa aérea y el carbono contenido en la biomasa de las raíces. La biomasa aérea

comprende el tronco, hojas y ramas; mientras que el carbono en las raíces es definido como la biomasa subterránea (Ordóñez y Masera, 2001).

2.2.1 Biomasa aérea

La vegetación tiene la capacidad de asimilar el carbono e incorporarlo en su estructura, a través de la fotosíntesis y lo mantiene almacenado por largos periodos. Por esta razón los bosques son importantes sumideros de carbono. Una vez que el dióxido de carbono (CO_2) atmosférico es incorporado a los procesos metabólicos de las plantas mediante la fotosíntesis, éste constituye compuestos complejos que forman todas las estructuras necesarias para que plantas como el árbol puedan desarrollar follaje, ramas, raíces y tronco (Ordóñez y Masera, 2001).

El árbol al crecer va incrementando su follaje, ramas, flores, frutos y yemas (que en su conjunto conforman la copa); así como la altura y grosor del tronco; los componentes de la copa de los árboles aportan material orgánico al suelo, como la capa de hojas que reciben el nombre de mantillo con un grado de descomposición más avanzado, misma que al degradarse se incorpora paulatinamente y da origen al humus estable, que a su vez aporta nuevamente dióxido de carbono al entorno y da continuidad a otros procesos conocidos con el nombre de ciclos biogeoquímicos (Ordóñez-Díaz, 2008).

La estimación de la captura de carbono no es simple, ya que influyen muchas variables que hacen compleja su estimación; incluyendo la cantidad de carbono fijado en la biomasa de organismos vivos que se gana año con año, expresada en su crecimiento. La información previa para la estimación de la captura de carbono en ecosistemas forestales es parte de un inventario forestal expresado en metros cúbicos por hectárea y el incremento corriente anual expresado en metros cúbicos por hectárea al año, es decir crecimiento o ganancia de biomasa (Ordóñez-Díaz, 2008).

Existen varios métodos para estimar la cantidad de CO_2 fijado por la vegetación; sin embargo, en numerosos estudios se ha empleado uno simple, en el cual los datos existentes de biomasa por hectárea (B) son multiplicados por un factor (F),

que involucra el contenido de carbono (CC) en la biomasa seca y la relación entre el peso de la molécula de CO₂ (44) y el peso del átomo de C (12) (Rojo-Martínez *et al.*, 2003):

$$\begin{aligned} \text{CO}_2 &= B * F \\ F &= \text{CC} * 44 / 12 \end{aligned}$$

El contenido de carbono de la madera de las coníferas arbóreas está entre un 50 y 53%, mientras que las especies de hoja ancha varían entre 47 y 50% (Ramírez *et al.*, 1997). Algunos factores de conversión de biomasa de tronco a biomasa total de árboles (incluyendo hojas, ramas y raíces) varían entre 1.3-3.6 (con un promedio de 2.5) para bosques y selvas naturales y entre 1.3-2.7 (promedio 1.9) para plantaciones forestales (Ramírez *et al.*, 1997; Brown y Lugo, 1984; Thorainsorn *et al.*, 1991), esto debido a que tanto los bosques como las selvas naturales cuentan con la regeneración natural y con el sotobosque, característico de esos ecosistemas, no así las plantaciones forestales (Rojo-Martínez *et al.*, 2003).

Para la medición de la cantidad de biomasa aérea en cualquier sistema de uso de la tierra, se requiere primero realizar inicialmente un análisis destructivo directo o estimaciones indirectas, determinando la altura y diámetro de los árboles, a fin de poder encontrar funciones matemáticas basadas en las relaciones alométricas que ocurren entre los órganos de un individuo (Alegre *et al.*, 2001)

Es de vital importancia la conservación de los bosques naturales como sumideros de CO₂ incentivando la creación de nuevas masas forestales a través de forestaciones (plantaciones comerciales, urbanas y recreativas) y reforestaciones (plantaciones protectoras, faunísticas y escénicas) en complemento con la regeneración natural; como estrategia para reducir la concentración de los GEI al incrementar la biomasa forestal, lo cual permite almacenar el C en los tejidos de las plantas y otros componentes de la vegetación, tales como los suelos, la hojarasca y la necromasa (Rojo-Martínez *et al.*, 2003).

2.2.2 Biomasa subterránea

El contenido de CO en el suelo llega a superar en dos ó tres veces los depósitos de C de la biomasa aérea (Schlesinger, 1991; Eswaran *et al.*, 1993; Etchevers *et al.*, 2001); las reservas de C total en el suelo representan 75 % del C almacenado en los ecosistemas terrestres (Post *et al.*, 1990; Acosta *et al.*, 2001; Lal, 2007), la acumulación de C en la materia orgánica humificada del suelo constituye alrededor de 58 % (Etchevers *et al.*, 2001).

En su estudio, Avilés-Hernández, *et al.* (2009), observó que conforme se incrementa la profundidad, la cantidad de biomasa de las raíces finas disminuye de 4 a 6 veces respecto a la primera capa (0 a 20 cm de profundidad). El mayor contenido de C total (raíces finas y suelo) se observó en la planicie con 208 Mg C ha⁻¹ y el menor en la cresta con 159 Mg C ha⁻¹. Considerando los 45 cm superficiales de suelo mineral, la mayor reserva de C almacenado se encuentra en la profundidad 0-15 cm. El C en raíces finas, comparado con la reserva en suelo mineral, fue menor a 10 %.

2.3 CARBONO EN EL SUELO

La mayor parte del carbono presente en la atmósfera, se captura y almacena en los suelos del mundo; sin embargo, existe desacuerdo, respecto a los efectos del cambio climático sobre los stocks mundiales de carbono en el suelo (Davidson y Janssens, 2006).

En el mundo, el contenido de CO del suelo se ha obtenido a partir de datos de perfiles de suelo que provienen de mapas edafológicos; estos resultados se generalizan con la aplicación de sistemas de información geográfica (SIG) para estimaciones regionales y nacionales (Segura-Castruita *et al.*, 2005). Escala que en muchas ocasiones no es posible aplicar a nivel regional.

El carbono esta contenido y distribuido en las capas que conforman el suelo forestal , donde crece la vegetación, que a lo largo del tiempo va formando capas por depositación de materiales, las que al irse acumulando y compactando

almacenan una cierta cantidad de carbono, que se incrementa por la continuidad del proceso de formación del suelo (Ordóñez y Masera, 2001).

La capacidad de almacenamiento de carbono por el suelo está ganando importancia en el contexto del cambio climático global, ya que el suelo podría secuestrar el carbono que las plantas remueven como CO₂ de la atmósfera, procedente de la combustión de combustibles fósiles o de la deforestación (Peña-Ramírez *et al.*, 2009). Este es uno de los servicios ambientales que proporciona el suelo; la capacidad de captura de carbono varía de acuerdo con el tipo de suelo y sus características, historial de manejo y factores ambientales (Vergara-Sánchez *et al.*, 2004).

El suelo está permanentemente cambiando debido a la frecuencia cíclica de procesos de adición de residuos orgánicos; las diferencias en la química y la estructura de los suelos y en la cantidad y calidad de estos residuos son causa de la gran diversidad en los tipos de vegetación (Who, 2004).

La parte activa del suelo está representada por la materia orgánica y ésta cambia con la profundidad, la textura del suelo y su composición química (Post *et al.*, 1990). Las existencias de materia orgánica en los suelos son resultado del equilibrio entre entradas y salidas de carbono en el ambiente bajo el suelo. Las entradas son principalmente de hojas y detritus de la raíz. Las salidas son dominadas por el flujo de salida de CO₂, debido casi en su totalidad a la respiración de las raíces y a la respiración de los microorganismos que descomponen la materia orgánica (Davidson y Janssens, 2006).

De acuerdo con Gómez-Tagle *et al.* (2003), la cantidad de carbono edáfico existente en un sitio determinado depende principalmente de la humedad edáfica, la temperatura del aire y del suelo, y del tipo de cobertura vegetal; ya que la mayor parte del carbono edáfico proviene del material vegetal descompuesto. La cantidad de carbono está relacionado con la tasa de descomposición y de la calidad de la materia orgánica en el material vegetal.

Se estima que el total del C acumulado en los suelos de todo el mundo es mayor que la suma de éste en la atmósfera y en la vegetación (Swift, 2001). Los suelos que almacenan más C son Histosoles (204.5 kg m^{-2} hasta 100 cm de profundidad), seguida de Andisoles (30.6 kg m^{-2} hasta 100 cm de profundidad) (Eswaran *et al.*, 1993). En Andisoles, el C orgánico a partir de compuestos húmicos se estabiliza en forma de minerales complejos amorfos humus-aluminio y no sólo con los iones de aluminio, sino también con los iones de hierro (Mizota y van Reeuwijk, 1989; Shoji *et al.*; 1993 Egli *et al.*, 2008).

Los suelos de México presentan contenidos de carbono orgánico que varían de 0.006 a 16.4% en el horizonte superficial (0 a 20 cm de profundidad), lo que muestra su heterogeneidad en los diferentes ecosistemas (Segura-Castruita *et al.*, 2005).

2.3.1 Material orgánico y su relación carbono/nitrógeno.

La materia orgánica juega un rol principal en determinar la estructura de los suelos, la humedad, el pH y la disponibilidad de nutrientes para el crecimiento de las plantas. También, los tipos de microorganismos que viven en el suelo son influenciados grandemente por la materia orgánica (Who, 2004).

La relación carbono/nitrógeno es un valor numérico que determina la proporción de carbono con respecto a la de nitrógeno que podemos encontrar en un suelo, se utiliza para medir la biomasa y la evolución de la materia orgánica en los estudios de fertilidad del suelo. Para una buena humificación de la materia orgánica, es muy importante que la riqueza en carbono y nitrógeno esté situada entre determinados valores, debido a que la microfauna edáfica, que actúa en la mineralización de la materia orgánica, requiere carbono como fuente de energía y nitrógeno como intermediario en la síntesis de proteínas. Si la microfauna no dispone de alguno de estos elementos, la mineralización se hace lenta y por consiguiente la producción vegetal no dispone de suficientes nutrientes para su desarrollo y a su vez, el suelo puede perder parte de su estructura.

Thompson y Troeh (1988) mencionan que la relación C/N de 32:1 constituye el punto de equilibrio para la mineralización de los materiales orgánicos; también encontraron que la vegetación joven se mineraliza más rápido que los residuos maduros de las cosechas, ya que suelen contener un porcentaje de nitrógeno más elevado que las viejas, y muestran que los materiales con menor relación C/N se mineraliza alrededor de un 50% más rápido que los deficientes en nitrógeno.

Los nutrientes mineralizados son productos secundarios del metabolismo microbiano. En consecuencia todo lo que afecta a la actividad de los microorganismos, afectará también a la mineralización; entre los factores más importantes, al respecto, pueden mencionarse el agua, el oxígeno, el pH y la temperatura; cambios en la humedad y la temperatura del suelo asociados al cambio climático puede conducir a una alteración de la tasa de mineralización de la materia orgánica y por lo tanto pérdida de carbono de los suelos (Smith y Almaraz, 2004; Thompson y Troeh, 1988).

2.3.2 Uso de la tierra y su relación con el ciclo del carbono

EL Consejo civil mexicano para la silvicultura sostenible (CCMSS) declara que es fundamental realizar las adaptaciones necesarias en el marco regulatorio del aprovechamiento forestal (SEMARNAT 03-003) de la ley general de desarrollo forestal sustentable, ya que el cambio de uso de suelo en México es más económico, que los permisos y trámites para el aprovechamiento forestal, esto es, una solicitud de cambio de uso de suelo va de los \$ 734 pesos por hectárea a los \$6,550 pesos por más de 200 hectáreas, mientras que el permiso forestal va de los \$2.142 por 500 m³ de madera aprovechable a los \$5,929 pesos para más de 5 mil m³ (CCMSS, 2008).

Se estima que la deforestación contribuye al 17% de las emisiones antropogénicas de CO₂ a la atmósfera (IPCC, 2007). Con el fin de proteger las zonas boscosas de cambio de uso de la tierra es necesario cuantificar la productividad de los bosques y considerar sus beneficios, no sólo la producción de madera (para los biocombustibles o muebles), resinas o de celulosa, sino también la prestación de

servicios ambientales como captura de carbono, recarga de los acuíferos del suelo, y conservación superficial de agua, almacenamiento, entre otros (Peña-Ramírez *et al.*, 2009).

Los mecanismos para la captura de carbono que son viables actualmente se enfocan sólo a subprocesos del ciclo del carbono en la naturaleza: la captura terrestre, y específicamente a la captura de carbono por parte de ecosistemas boscosos; el IPCC, estima en su segundo informe de evaluación, que entre 60 y 87 Gt C ha⁻¹ podrían conservarse o captarse en los bosques para el año 2050, y que otras 23 a 44 Gt C ha⁻¹ podrían obtenerse de suelos agrícolas (IPCC, 2001).

La cantidad de C que un suelo puede secuestrar y su distribución son funciones de las características, del uso y manejo del suelo (Lal *et al.*, 1998; Schwager y Mikhailova, 2002). Prácticas que aumentan la producción de biomasa vegetal o que reducen la erosión y la oxidación microbiana de la materia orgánica, son efectivas para incrementar la captura del CO₂ atmosférico y mitigar los efectos ambientales negativos que causa el aumento de este gas de efecto de invernadero. Además, estas prácticas incrementan y preservan la calidad del suelo y mejoran la productividad agrícola (Carter *et al.*, 1997).

Una opción para recuperar las áreas deforestadas que están en proceso de degradación, podrían ser los sistemas agroforestales, que pueden almacenar cantidades adicionales de C. Así mismo otra opción es el desarrollar tecnologías agroforestales ecológicamente sostenibles para los agricultores de bajos recursos y que aumenten el bienestar de la población que vive dentro y alrededor de los bosques y otros ecosistemas (Lapeyre *et al.*, 2004).

2.4 CARBONO EN LOS SISTEMAS AGROFORESTALES

Las perturbaciones, naturales o antrópicas motivan con frecuencia que los bosques se conviertan en fuentes de CO₂ debido a que la tasa de productividad primaria neta es sobrepasada por la respiración total u oxidación de las plantas, del suelo y la materia orgánica muerta; sin embargo, algunas áreas de bosque que son aprovechados y degradados, o terrenos agrícolas y pastizales, que son

abandonados y vuelven de forma natural a ser bosques o se convierten en plantaciones, se transforman en sumideros de CO₂, es decir, la tasa de respiración de las plantas, del suelo y la materia orgánica muerta es sobrepasada por la productividad primaria neta (Kyrklund, 1990; Brown, 1997).

Kyrklund (1990) sostiene que la velocidad de absorción del CO₂ es directamente proporcional al crecimiento de las masas forestales, el preservar los bosques naturales es una manera poco eficaz de fijar CO₂. En cambio, un manejo forestal basado en cosechar en el mejor momento, convertir la madera con un mínimo de desperdicios en productos duraderos y regenerar debidamente el bosque, permite fijar al máximo C; evidentemente esta medida tiene límites, pues la utilización industrial de los bosques naturales no es factible desde el punto de vista de conservación del ecosistema (Rojo-Martínez *et al.*, 2003).

Existen sistemas agroforestales que pueden tener la misma función ambiental que muchos de los bosques manejados, por ejemplo la captura y almacenamiento de CO₂ (Pineda-López, 2005). Ávila *et al.* (2001), mencionan que los agroecosistemas no son reconocidos como parte de los sumideros y captura de carbono, debido a que no se conoce mucho sobre su potencial. Sin embargo estudios como el de Órtíz-Ceballos (2004) y Aguirre (2006), demuestran el potencial de captura de carbono en sistemas agroforestales de café bajo sombra que almacenan 195.69 Mg C ha⁻¹ y 172 Mg C ha⁻¹. Así como otros sistemas agroforestales mencionados por Callo (2001) de huertos caseros que almacenan 195.73 Mg C ha⁻¹ y sistema silvopastoril que almacena 119.75 Mg C ha⁻¹. Es así que dichos sistemas tienen un potencial de producción para el aprovechamiento alimenticio, a la vez que prestan un servicio ambiental de captura de carbono. Lapeyre *et al.* (2004), realizaron un estudio en diferentes ecosistemas y sistemas productivos, encontrando que los niveles de C en la biomasa aérea de los sistemas agroforestales son más altos (19-47 Mg C ha⁻¹) que en los sistemas agrícolas y en los pastos manejados (5 Mg C ha⁻¹), teniendo en cuenta esto y los beneficios ambientales de dichos sistemas, es recomendable utilizarlos en áreas degradadas.

Los sistemas agroforestales tienen la capacidad para almacenar carbono, Concha *et al.* (2007) mencionan que la captura de carbono en sistemas agroforestales está en función de las especies propias del sistema, prácticas silviculturales, manejo adecuado de la plantación mediante podas y otras prácticas culturales; mientras que Alegre *et al.* (2000) mencionan que esta captura varía en función de la edad, diámetro, altura de los componentes arbóreos como la densidad de población de cada estrato y por comunidad vegetal.

Los sistemas agroforestales, al combinar los cultivos agrícolas con especies forestales, incrementan sus niveles de captura de carbono, mejorando además su productividad. En el mercado de carbono se podría obtener pagos que mejorarían la rentabilidad de la producción y ayudaría a su mantenimiento, con ello el establecimiento de estos sistemas serían más atractivos para las comunidades (Lapeyre *et al.*, 2004)

Los mercados de fijación de carbono se están abriendo bajo el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) del Protocolo de Kyoto, recompensando la plantación de árboles como una forma de remediar las emisiones de gases causantes del efecto invernadero. En México, la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) ha invertido más de un millón 500 mil pesos en el programa especial para la seguridad alimentaria (PESA) que coordina la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), lo que ha permitido la conservación de un millón 71 mil hectáreas de bosques y selvas en el país, beneficiando a 2,078 comunidades de alta marginación principalmente (SEMARNAT, 2008).

En el caso particular del pago por servicios de captura de carbono, el pago por tonelada se determina en función del cumplimiento de criterios ambientales y sociales para abonar puntos sobre un precio base de \$50 y hasta un máximo de \$100 por tonelada. Se otorgará como anticipo el 50% del apoyo autorizado para su elaboración y el pago final del 50% restante se realizará una vez que la idea de proyecto de captura de carbono haya sido aceptada por la CONAFOR y autorizada por el Comité Técnico Nacional (Pérez-García *et al.*, 2009).

Las plantaciones de rápido crecimiento tienen más posibilidades de ser escogidas que las actividades de restauración de ecosistemas boscosos naturales; sin embargo, aunque éstas pueden tener una rápida fijación durante 20 a 40 años, el C almacenado a largo plazo puede ser menor, además de que las áreas restauradas cercanas a la vegetación natural pueden ser reforzadas con la regeneración natural (Rojo-Martínez *et al.*, 2003).

En México, un claro ejemplo de captura de C se encuentra en el Estado de Chiapas donde se está desarrollando el proyecto Scolel Té (cultivando árboles) el cual tiene como objetivo la capturar carbono en diferentes sistemas forestales y agroforestales en zonas indígenas (De Jong *et al.*, 2005).

.

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

3.1.1 Localización

El área de estudio se ubica dentro de la cuenca del Río Texcoco, que forma parte de la Sierra Nevada. La Sierra Nevada es un sistema montañoso de aproximadamente 1,227 km², colinda con los estados de Puebla, Tlaxcala, Morelos y México; es reconocido como una provincia biótica regionalizada con base a rasgos geológicos, tectónicos, geomorfológicos y biogeográficos que originan una gran variedad de ecosistemas. Su importancia radica en que por su extensión y cubierta vegetal es un valioso almacén de carbono para las zonas conurbanas (Tapia y López, 2001) (Figura 1).

El área de estudio comprendió sitios de monitoreo georeferenciados a lo largo de un gradiente altitudinal de 2719 a 4120 m sobre la fisiografía oeste del Cerro del Tlaloc, entre 19° 29' 45" y 19° 23' 48" N y entre 98° 50' 05" y 98° 42' 09" W, y colinda con las poblaciones de San Pablo Ixayoc, Tequesquinahuac y Santa Catarina del Monte pertenecientes al municipio de Texcoco (Figura 2).

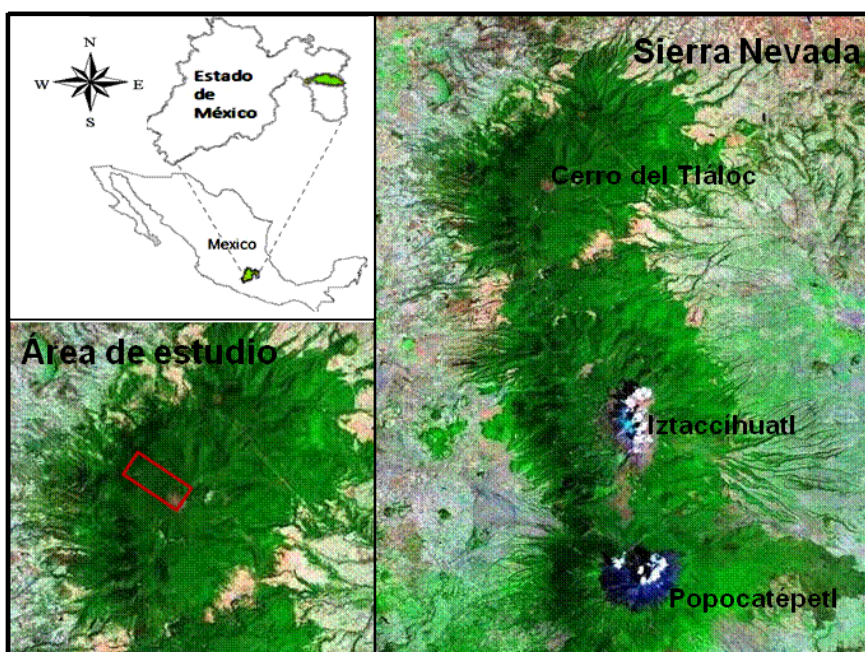


Figura 1. Localización del área de estudio (La fotografía fue obtenida de: <http://geology.com/news/2007/popocatepetl-volcano-erupts>).

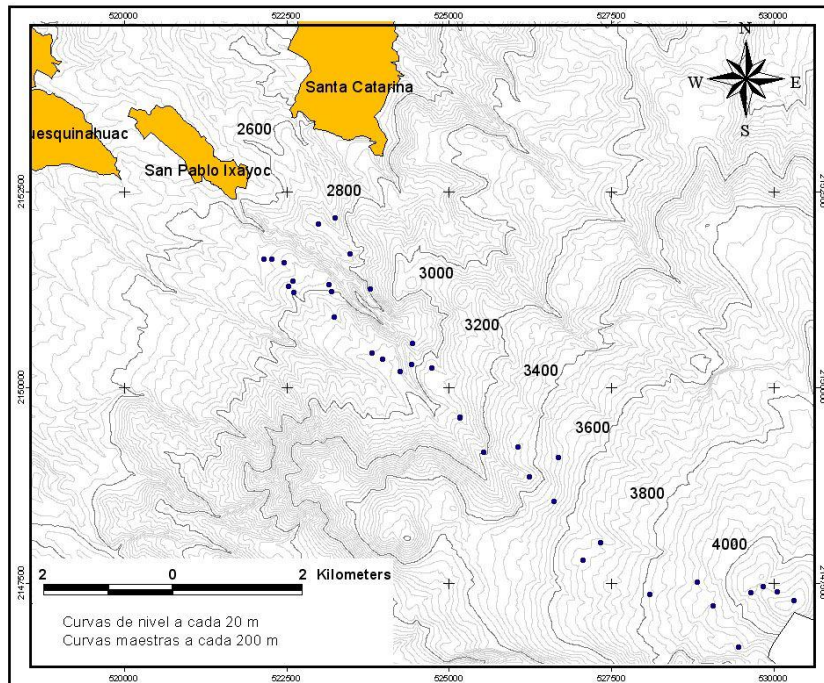


Figura 2. Sitios de muestreo en el área de estudio (•).

3.1.2 Clima

El clima en el área de estudio cambia dependiendo del gradiente altitudinal, en general es templado húmedo con una temperatura media anual mínima de 10 a 12°C y máxima de 14 a 18 °C, con régimen de lluvias en verano y precipitación media anual que va de 700 a 1200 mm. En la parte alta se presentan nevadas, neblina y rocío frecuente (Sánchez *et al.*, 2006). En piedemonte hay una transición progresiva de un régimen de humedad ústico a údico del suelo, existe una época de sequía bien definida de noviembre a abril, y las lluvias se distribuyen irregularmente entre mayo y octubre (Etchevers *et al.*, 2002).

3.1.3 Vegetación

Con base al recorrido por el área de estudio y a lo reportado por Rzedowski (2006) y Sánchez (2003), existen diferentes biotipos a lo largo del gradiente altitudinal en estudio. El zacatal alpino se adapta de 4000 a 4500 msnm en el eje volcánico transversal, en el área de estudio las especies representativas son *Agrostis tolucensis*, *Alchemilla procumbens*, *Calamagrostis intermedia*. El bosque de pino y

oyamel se encuentran a elevaciones superiores a 3000 m, en el área de estudio el bosque de *Pinus hartwegii* se localiza desde los 3500 hasta los 4000 m, ya que es una especie de *Pinus sp* tolerante a las temperaturas bajas, mientras que el bosque de *Abies religiosa* se ubica en una altitud que delimita a las regiones de zonas húmedas en la montaña, entre los 3000 y 3500 m. El bosque de *A. religiosa* es denso, mientras que el bosque de *P. hartwegii* es espaciado.

El área de estudio incluye el bosque de cedro *Cupressus lusitanica*, los cuales se desarrollan en sitios de clima o microclima húmedo y fresco, a menudo en cañadas, se observa entre 1800 y 3000 m de altitud. En el bosque de encino las especies dominantes son *Quercus rugosa* y *Q. laurina* encontradas a altitudes mayores de 2400 m. En el área de estudio la zona de tepetate está rehabilitada con *Pinus radiata*, *Pinus montezumae* y *Cupressus indley*, especies de bosque bajo adaptados a precipitaciones entre 600 y 1000 mm.

El principal cambio de uso de suelo es la agricultura de temporal siendo los cultivos más importantes: maíz (*Zea mays*), frijol (*Phaseolus vulgaris*), asociación maíz-frijol-calabaza (*Cucurbita pepo*), cebada (*Hordeum vulgare*), haba (*Vicia faba*) y avena (*Avena sativa*) (Adame y Martínez, 1999) (Figura 3).

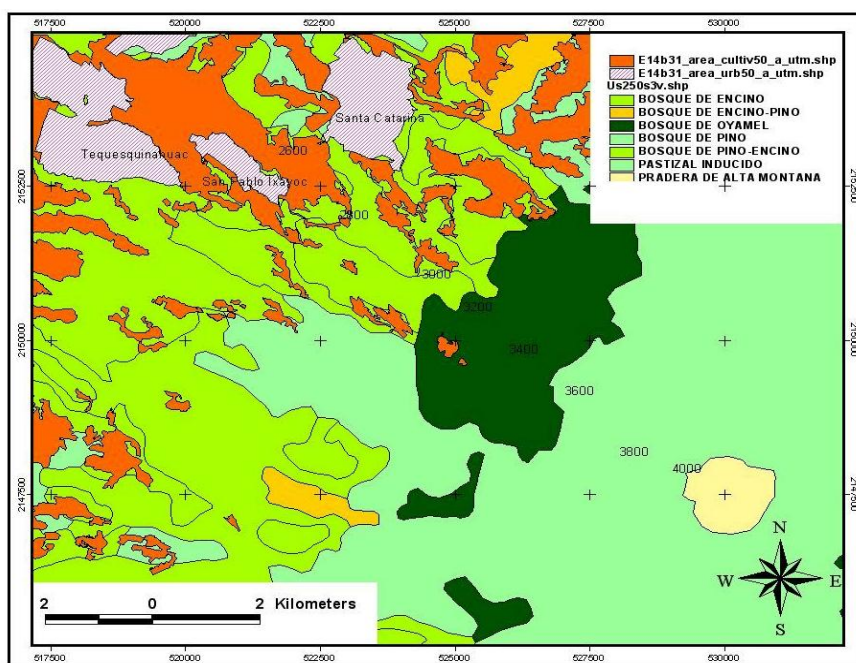


Figura 3. Vegetación y uso de suelo en el área de estudio.

3.1.4 Geomorfología

El relieve es de origen endógeno volcánico modelado, su formación empezó en el mioceno, y continua en el plioceno medio y en la era actual, pero en ésta sólo con un carácter explosivo que contribuyó a la formación del relieve montañoso, rasgo litológico de rocas básicas e intermedias y flujos piroclásticos (Yarza, 2003). El área de estudio se caracteriza por un relieve accidentado representado por laderas escarpadas, lomeríos y cañadas, en la parte baja los suelos son delgados y erosionados y con afloramiento de tepetate, suelos volcánicos que presentan en sus perfiles horizontes endurecidos (Adame y Martínez, 1999).

3.1.5 Suelo

Los suelos son negros, profundos, muy ricos en materia orgánica y de textura media. Los valores de pH varían de 5.5 a 7.1 (Sánchez *et al.*, 2006). Los suelos en el área de estudio, (con base en la clasificación de la FAO-UNESCO) son andosoles y cambisoles; los andosoles son suelos derivados principalmente de ceniza volcánica vítrea, tienen un horizonte A oscuro, textura media, alto contenido de materia orgánica, pero ácido, alta capacidad de retención de agua y capacidad de intercambio, su rasgo más sobresaliente es la formación masiva de complejos amorfos humus-aluminio y retienen con firmeza al fósforo, lo que refleja una deficiencia de este elemento en el suelo. Los cambisoles se desarrollan en sitios cuya topografía son colinas suaves a fuertemente inclinadas, el horizonte A es moderadamente húmico de color pardo grisáceo y amarillo, con un pH que varía de 5.5 a 6.5, son suelos de textura media, con fertilidad que varía de moderada a baja, ocasionada por la variación en el contenido de materia orgánica y nutrientes; el cual se reduce su profundidad efectiva en un ámbito de 15 a 20cm cuando hay la presencia de un estrato con carácter de fragipan; además, presentan baja conductividad hidráulica, alta vulnerabilidad y riesgo a procesos de degradación estructural que puede ocasionar sellado, encostramiento, compactación y erosión por escorrentía superficial (INEGI, 2009 y Báez-Pérez *et al.*, 2007).

Los tepetates se encuentran a piedemonte con áreas rehabilitadas a través de la reforestación. Rodríguez-Tapia *et al* (2004) considera que los tepetates de la ladera oeste del cerro Tláloc son saprolita derivada de tobas cristalinas andesíticas, que han disminuido su litificación geológica original, por intemperismo y pedogénesis.

3.2 ESTABLECIMIENTO DE LOS SITIOS

En seguimiento al monitoreo de Martínez (2010), se cuantificó el contenido de carbono orgánico almacenado en cuatro estratos: 1) Biomasa aérea (arriba del suelo): árboles, arbustos y vegetación herbácea; 2) Biomasa subterránea (abajo del suelo): sistema radical; 3) Material orgánico sobre el suelo: hojarasca, mantillo, ramas y troncos caídos y en pie; y 4) Carbono orgánico del suelo (Márquez, 2000)

3.2.1 Sitios de muestreo

Los inventarios utilizan parcelas permanentes de muestreo como un medio para obtener datos estadísticamente más confiables. Estas parcelas permiten evaluar eficientemente los cambios en la fijación de carbono. En el muestreo 2009 Martínez (2010) estableció 27 sitios, en el presente estudio se cuantifico el carbono de 25 de éstos sitios más 10 sitio nuevos, teniendo un total de 35 sitios, distribuidos como se muestra el Cuadro 1 y se realizo en ocho ecosistemas, con diferentes repeticiones como un medio para obtener datos más confiables

Cuadro 1. Ecosistemas y uso del suelo del área de estudio.

Ecosistemas			Altitud (msnm)	Núm. de sitios
1	Reforestado de 30 años	R2	2719-2737	3
2	Reforestada de 10 años	R1	2778-2806	3
3	Terrenos agrícolas	Ag	2789- 2989	4
4	Bosque de <i>Quercus laurina</i>	BE	2736- 2989	6
5	Bosque de <i>Cupressus lusitanica</i>	BC	2953- 3057	3
6	Bosque de <i>Abies religiosa</i>	BO	3088- 3489	6
7	Bosque de <i>Pinus hartweggi</i>	BP	3681- 3935	6
8	Zacatal alpino	ZA	4050- 4119	4

Cada sitio de muestreo consistió en una superficie radial de aproximadamente 1000m², excepto en terrenos agrícolas que son de 500m², ajustando el radio a la

pendiente del terreno, divididas en ocho subunidades de 125m^2 para el levantamiento de datos de árboles y arbustos, cuatro subunidades de 1m^2 distribuidas al azar para muestreo de hierbas, mantillo y suelo (Figura 4-a) (Delgadillo y Quechulpa, 2006). En el estudio, el mantillo se subdividió en dos materiales con diferente grado de descomposición la hojarasca y el mantillo como tal; la primera es el depósito de biomasa de hojas caídas, mientras que el mantillo se entiende como el material que se encuentra en un grado mayor de descomposición que aun no se integra al horizonte orgánico del suelo. Cabe aclarar que en algunos sitios establecidos por Martínez (2010) se muestro en las subunidades una hojarasca nueva, esto es, hojas depositadas en el transcurso de un año (Figura 4-b).

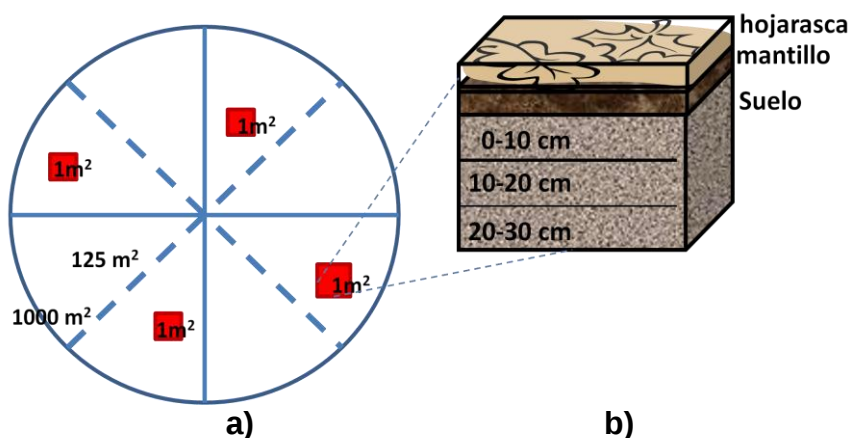


Figura 4. a) Esquema del sitio de muestreo y subunidades. b) Material orgánico y perfil de suelo muestreado en las subunidades.

3.3 MUESTREO Y ESTIMACIÓN DE CARBONO

3.3.1 Estrato arbóreo.

En el muestreo de árboles, se realizó un inventario forestal por especie en los sitios de *BP*, *BO*, *BE*, *BC* y área reforestada. Se midió el diámetro fustal a la altura del pecho de 1.3 m (DAP) y se midió también el diámetro a partir de 3 cm (Etchevers *et al.*, 2005). La población forestal se agrupó en brinzal (DAP de 3 a 10

cm), latizal (DAP $<10 \geq 25$ cm), joven fustal (DAP $<25 \geq 50$), medio fustal (DAP $<50 \geq 80$) y grande fustal (DAP > 80 cm) en cada sitio de muestreo.

La biomasa arbórea por individuo se calculó mediante modelos alométricos, que se muestran en el Cuadro 2, mismos que fueron aplicados en 2009 por Martínez (2010). Se consideró el factor carbono de 0.5 recomendado por la IPCC.

Cuadro 2. Ecuaciones alométricas para el cálculo de biomasa aérea en kg árbol⁻¹

Especie	Ecuaciones	Referencia
<i>Pinus spp</i>	$A = 0.084 \cdot \text{DAP}^{2.47}$	Ayala, 1998
<i>Abies religiosa</i>	$A = \exp(-2.2304 + 2.44351 \ln \text{DAP})$	Jenkins, et al., 2003
<i>Quercus spp</i>	$A = 1.91 \cdot \text{DAP}^{1.782}$	Ayala, 1998
<i>Cupressus lusitánica</i>	$A = \exp(-1.170 + 2.119 \cdot \ln(\text{DAP}))$	Brown, 1996

Donde: A = Biomasa en kg, DAP = Diámetro a la altura del pecho de 1.30m.

Asimismo, se consideró el carbono que aportan las raíces gruesas y finas de los árboles, multiplicando la biomasa arbórea por la fracción de carbono en raíces (Cuadro 3) que se utilizaron en el muestreo 2009 (Martínez, 2010).

Cuadro 3. Factor carbono para la determinación de biomasa radical.

Especie	Factor carbono	Referencia
<i>Pinus y Abies</i>	0.26	Cairns et al., 1997
<i>Quercus y Cupressus</i>	0.25	Cairns et al., 1997

El total de carbono en árboles de cada ecosistema fue la suma del número de individuos evaluados en la parte aérea y subterránea en el sitio.

3.3.2 Estrato arbustivo, herbáceo, hojarasca y mantillo

Los arbustos evaluados en el muestreo fueron especies con valor de importancia relativa (Sánchez, 2003) principalmente en los sitios de bosque de encino y reforestado de 30 años. En la mayoría de los sitios se obtuvieron muestras de la vegetación herbácea, excepto en los terrenos agrícolas. Sobre el suelo se colectó la hojarasca y “hojarasca nueva” y mantillo de la mayoría de los sitios excepto agrícola y zacatal alpino; en este último sólo se encontró vegetación herbácea y mantillo; se colectaron también las ramas secas o leña.

Se extrajeron cuatro muestras representativas por cada uno de los estratos (arbustos, vegetación herbácea, mantillo y hojarasca) de los sitios; se pesó en campo con una balanza de reloj y se obtuvo el peso húmedo (en el caso de leña fue el peso seco) y se formó una muestra compuesta de 100 g aproximadamente por estrato y en el caso de los arbustos por especie (Delgadillo y Quechulpa, 2006).

Las muestras fueron procesadas en el Laboratorio de Ecología del Departamento de Fitotecnia en la Universidad Autónoma Chapingo. Se evaluó el porcentaje de carbono y nitrógeno de los estratos con el analizador Perkin Elmer 2400, Serie II (analizador de gases de carbono y nitrógeno).

El procesamiento de muestras consistió en secar la muestra en una estufa marca Felisa Modelo FE-294A a una temperatura de 50 a 60°C para no alterar la composición química de los materiales y en obtener el peso seco en una balanza analítica. El material seco se pulverizó en un molino Thomas-Wiley Modelo 4 con malla de 1mm y se terminó de moler en un mortero hasta obtener un tamaño de partícula muy fino; después se formó una muestra compuesta por ecosistema y uso de suelo evaluado (ZA, BP, BO, BC, BE, R1, R2 y Ag), se secó nuevamente en la estufa a 60°C para después pesar y encapsular entre 2 y 3 mg del material.

La estimación de carbono se obtuvo multiplicando el peso de la biomasa seca por la fracción de carbono específica obtenido en el analizador (%) de cada estrato expresado en Mega gramos por hectárea ($t=Mg\ ha^{-1}$) En el caso de la leña se multiplicó por la fracción de carbono recomendada por la IPCC (Etchevers *et al.*, 2005).

3.3.3 Suelo

Se extrajeron diferentes muestras de suelo según los fines de evaluación, tanto de carbono como de otras variables consideradas en el muestreo de Martínez (2010): textura, potencial de hidrógeno, materia orgánica, nitrógeno inorgánico, fósforo y se incluyó el análisis de capacidad de intercambio catiónico

Se muestreo el suelo en los perfiles 0-10, 10-20 y 20-30cm en las cuatro subunidades de cada sitio con el método de barrena de volumen conocido, en las que se determinó el contenido de carbono y nitrógeno (%). El método se ajustado en el área reforestada de 30 con suelo de tepetate, donde se extrajo cuatro muestras compuestas por sitio del perfil de 0-30 cm, debido a que no fue posible usar la barrena por lo duro del terreno, por lo que se escavó con barreta y pala.

Las muestras fueron sometidas a un proceso de preparación antes del análisis como se describe a detalle en Etchevers *et al.*, (2005) con la modificación de tamizar con malla 50mm para eliminar residuos de carbono derivado de incendios forestales y de utilizar el analizador de carbono y nitrógeno Perkin Elmer 2400, Serie II (analizador de gases COHNS).

Para la determinación del contenido de carbono orgánico en el suelo por cada horizonte por hectárea se utilizó la siguiente fórmula (Ruiz, 2002).

$$CC = CS * Da * P * 100$$

Donde:

CC= contenido de carbono ($Mg\ ha^{-1}$)

COS= carbono orgánico del suelo (%)

Da= densidad aparente ($t\ m^{-3}$)

P= profundidad del suelo (m)

El cálculo de COS se realizó con una densidad ajustada, esto es, descontando al volumen y peso conocido de la barrena el volumen de piedras, raíces y residuos (e.g. insectos muertos y pedazos de carbono mineral). Las raíces extraídas se procesaron como la hierba, hojarasca y mantillo descrito anteriormente, obteniendo su contenido de carbono en porcentaje y que se multiplica por la biomasa.

Una vez obtenida las muestras pequeñas, en las mismas subunidades de muestreo, se extrajeron de los perfiles de 0-30 y de 30-60cm cuatro y dos muestras compuestas de suelo respectivamente, mediante el método de la pala. Estas muestras se analizaron en el Laboratorio Central del Departamento de Suelos de la Universidad Autónoma Chapingo. Para la profundidad de 0-30cm se

determinó la textura mediante el método de hidrómetro de Bouyoucos y la capacidad del intercambio catiónico mediante el método del acetato de amonio. Tanto para la profundidad 0-30cm como para la 30-60cm se determinaron el potencial de hidrógeno mediante el método del agua, materia orgánica por el método de combustión húmeda descrita por Walkley y Black, nitrógeno inorgánico extraído con cloruro de potasio 2N y determinado por arrastre de vapor, y el fósforo extractable por el método de Bray P1 y Olsen (Castellanos *et al.*, 2000).

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El resultado obtenido de la suma total del contenido de carbono en los ecosistemas en el cerro Tláloc es de 1,629.81 Mg C ha⁻¹, distribuido en tres almacenes o sumideros; la biomasa con 681.69 Mg C ha⁻¹, material orgánico arriba del suelo con 57 Mg C ha⁻¹, y el suelo más el carbono de las raíces finas con 890 Mg C ha⁻¹(Figura 5)., que a continuación se describen mas a detalle, así como algunos aspectos físicos y químicos del suelo relacionados al almacenamiento de carbono.

Los ecosistemas con mayor contenido de carbono total de sus almacenes, fue el bosque de oyamel y bosque de cedro con un promedio de 327.86 Mg C ha⁻¹, así también los sistemas forestales presentaron un almacenamiento mayor al de los ecosistemas que carecen de estrato arbóreo como el zacatal alpino y los que tienen estrato arbóreo en una etapa de desarrollo joven (sotobosque) como los reforestado de 10 y 30 años, además que estos dos últimos son áreas degradadas y con suelo tepetate.

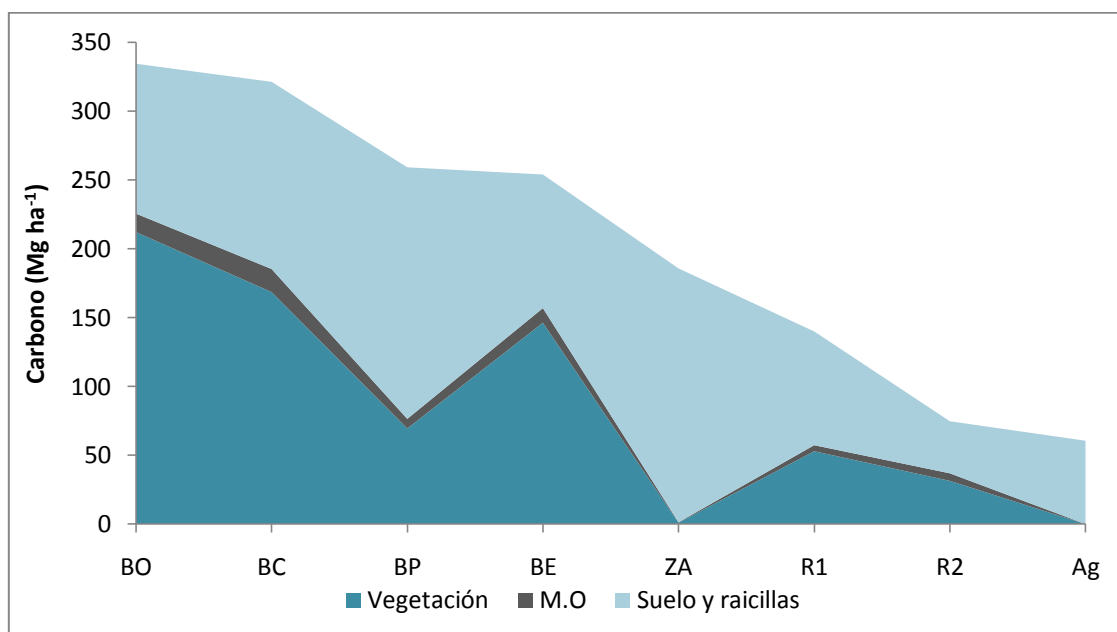


Figura 5. Contenido total de carbono en los ecosistemas del Cerro Tláloc. Vegetación=árboles, arbustos y hierbas, M.O=leña, mantillo y hojarasca, Suelo=suma de los perfiles 0-10, 10-20, 20-30 cm. BO=bosque de oyamel, BC=bosque de cedro, BP= bosque de pino, BE= bosque de encino, ZA= zacatal alpino, R1=reforestado de 10 años, R2 reforestado de 30 años, Ag=terrenos agrícolas.

4.1 CARBONO EN BIOMASA AÉREA

La suma total del contenido de carbono en la biomasa fue de 681.69 Mg C ha⁻¹ almacenado en los diferentes ecosistemas y por estrato como se muestra en el Cuadro 4. Se observa que el estrato arbóreo (aéreo y subterráneo) contienen en promedio el 98.5% de C con respecto a los arbustos y hierbas. Los ecosistemas con mayor contenido de C son el BO y BC obteniendo en su biomasa total 212.14 y 168.53 Mg C ha⁻¹ y que representa de un 53 a 64% con respecto al carbono del suelo (Cuadro 6). Respecto a lo reportado por Martínez (2010) no se observa un cambio en su almacenamiento, sin embargo, en el mayor número de sitios del muestreo, disminuyó el rango de confianza de los valores, en comparación al muestreo 2009.

Cuadro 4. Contenido de carbono en la vegetación en el Cerro Tláloc.

Ecosistemas	Arboles*		Arbustos**		Hierbas		C Total	
----- Mg C ha ⁻¹ -----								
Reforestado de 30 años	----- n = 3-----							
Promedio	29.49	± 2.44	1.57	± 0.21	0.33	± 0.04	31.37	± 2.45
Rango	36.86	-18.5	2.51	-0.84	0.47	-0.17	39.66	-20.34
Reforestado de 10 años	----- n = 3-----							
Promedio	52.56	± 2.65	-		0.36	± 0.03	52.92	± 2.63
Rango	64.23	-40.64	-		0.44	-0.24	64.64	-41.08
Bosque de encino	----- n = 6-----							
Promedio	142.67	± 8.65	2.75	± 0.30	0.8	± 0.11	146.22	± 8.86
Rango	246.22	-76.3	5.53	-0.76	2.13	-0.48	251.43	-77.53
Bosque de cedro	----- n = 3-----							
Promedio	167.56	± 4.35	-		0.97	± 0.77	168.53	± 4.50
Rango	178.83	-147.99	-		2.12	-0.28	179.33	-148.27
Bosque de oyamel	----- n = 6-----							
Promedio	206.32	± 5.89	-		5.82	± 0.17	212.14	± 5.91
Rango	254.67	-149.88	-		7.49	-4.26	259.02	-154.14
Bosque de pino	----- n = 6-----							
Promedio	68.83	± 4.20	-		0.63	± 0.16	69.46	± 4.18
Rango	129.52	-39.24	-		0.87	-0.25	129.77	-40.06
Zacatal alpino	----- n = 4-----							
Promedio					1.03	± 0.09	1.03	± 0.09
Rango					1.48	-0.66	1.48	-0.66

* Biomasa área y subterránea. ** Biomasa aérea. n=número de sitios de muestreo por sistema. Promedio = Promedio del contenido de carbono por sitios de muestreo por clase. Rango = valores de carbono mínimo y máximo por sitio de muestreo. ± = Error estándar.

En la Figura 6 se observa que existe una relación directa del almacenamiento de carbono con respecto a la madurez y desarrollo del bosque en los ecosistemas forestales de coníferas, ya que en el bosque de oyamel, cuya edad promedio es de 72 años, el 28.5 % de su población (fustal maduro de 50 hasta 102 cm de diámetro) contiene el 90% de C, mientras que en el bosque de pino, que tiene una edad promedio de 92 años, el 19% de su población arbórea (fustal maduro entre 50 y 79 cm de diámetro) contiene el 86.31% de C; sin embargo, en este último, la densidad de población es menor en comparación a los sitios del área reforestada de 10 años con una densidad de 2800 árboles ha^{-1} , en una etapa de desarrollo joven, son los ecosistemas con menor reservorio de C entre los sistemas forestales evaluados,

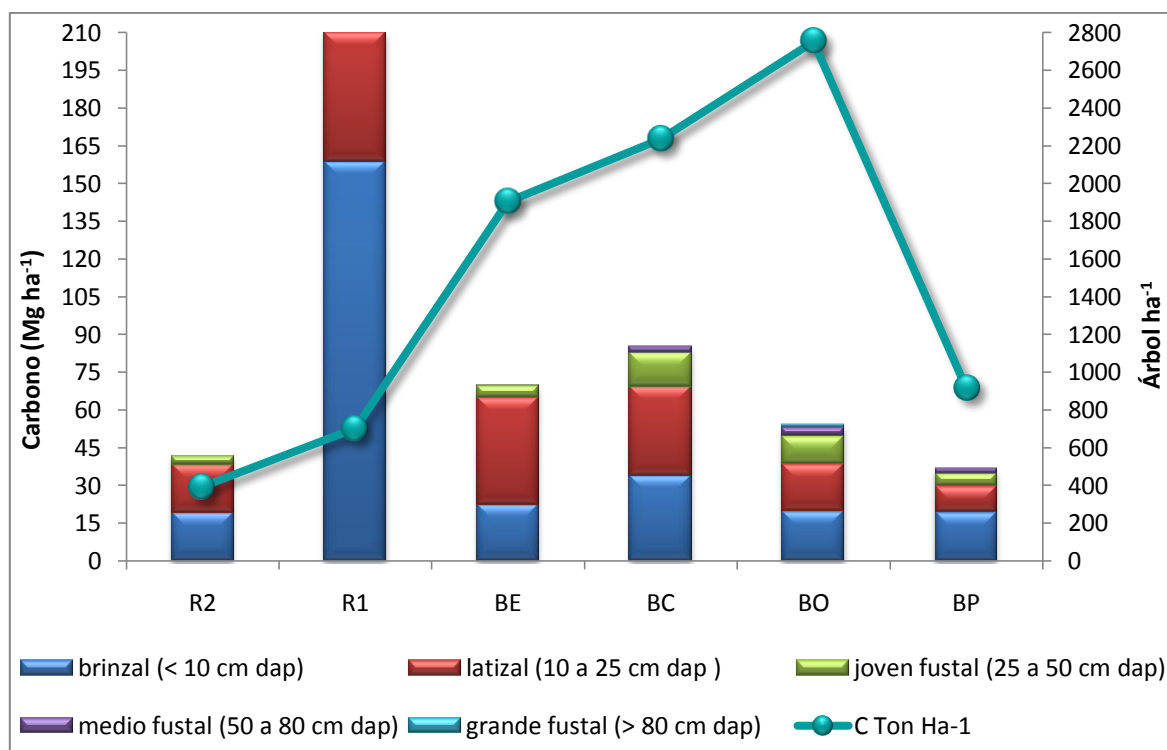


Figura 6. Carbono en biomasa forestal en ecosistemas del Cerro Tlálloc. R2=reforestado de 30 años, R1=reforestado de 10 años, BE=bosque de encino, BC=bosque de pino, BO=bosque de oyamel, BP=bosque de pino, dap = diámetro a la altura del pecho.

En el Cuadro 5, se observa que a un diámetro fustal constante de 41 y 42 cm, las especies de coníferas almacenan aproximadamente 500 kg de carbono por individuo contra 920 kg de carbono por individuo de la especie latifoliada de

Quercus laurina y *Q. rugosa* en el área de estudio. Este dato indica que todos los tipos de vegetación que se desarrollan en el oeste del cerro del Tláloc tienen un potencial alto de mitigar las emisiones de CO₂ bajo un manejo forestal sostenible, con las ventajas y desventajas propias de cada sistema y especie.

Cuadro 5. Relación entre el desarrollo fustal y el contenido de carbono.

Especie	Fuste (cm)	biomasa aérea	biomasa subterránea	Total
		-----kg individuo ⁻¹ -----		
<i>Abies religiosa</i>	3	0.91	0.24	1.15
	41	479.68	124.72	604.40
	102	4400.25	1144.06	5544.31
<i>Cupressus lusitanica</i> s	3	1.80	0.45	2.26
	42	427.44	106.86	534.30
	77	1557.69	389.42	1947.12
<i>Pinus hartwegii</i>	3	0.73	0.19	0.92
	41	405.92	105.54	511.46
	79	2019.52	525.08	2544.59
<i>Quercus laurina</i>	3	7.52	1.88	9.40
	42	736.31	184.08	920.38

Con respecto al estrato arbustivo, sólo se muestreo en el bosque de encino y en el área reforestada de 30 años; las especies vegetales presentes son siete: huacalillo (*Ceanothus coeruleus*) y *Mimosa* sp, que son de uso forrajero; el Palo dulce (*Eysenhardtia polystachya*) y pingüica (*Arctostaphylos pungens*) son de uso medicinal; el madroño (*Arbutus xalapensis*), generalmente su madera se utiliza para artesanías; aguacatillo (*Garrya laurifolia*) y jarilla china (*Senecio xarilla*), especies regeneradoras en los sistemas boscosos (Rzedowski, 1985). En el bosque de encino la biomasa del estrato arbustivo almacena en promedio 2.75 Mg C ha⁻¹, mientras que en el bosque reforestado de 30 años el estrato arbustivo almacena 1.57 Mg C ha⁻¹ (Cuadro 4), donde una importante cantidad del carbono lo aporta la especie de *Arbutus xalapensis* (Figura 7). En los otros sistemas forestales no se encontró o se tuvo una muy escasa presencia de arbustos, por lo que no se cuantificó el carbono.

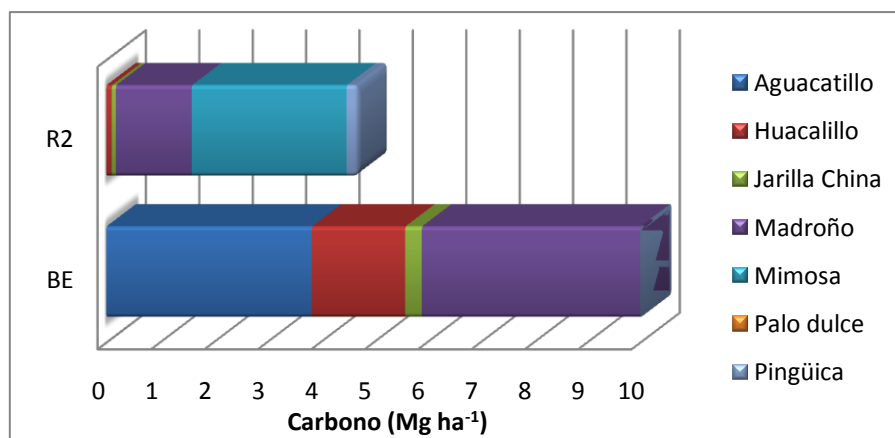


Figura 7. Contenido de carbono en biomasa arbustiva de dos ecosistemas; bosque de encino (BE) y reforestado de 30 años (R2).

4.2 CARBONO SOBRE EL SUELO

En este estudio se determinó el carbono orgánico en los materiales en diferentes grados de descomposición como la hojarasca, mantillo y leña (ramas y troncos caídos y en pie) que yacen sobre el suelo, además de la producción de carbono por año en la hojarasca nueva, como se muestra en el Cuadro 6.

Se muestra una estrecha relación entre el almacenamiento de carbono en los residuos vegetales sobre el suelo y el tipo de ecosistema, el contenido de C más alto se observó en el ecosistema de BC con $16.77 \text{ Mg C ha}^{-1}$, siendo que el 79% de este carbono se encuentra en el mantillo; mientras que en el BP y BO, el carbono en residuos vegetales fue de 6.95 y $13.4 \text{ Mg C ha}^{-1}$, respectivamente, y la mayor parte de este carbono también se encuentra en el mantillo. La producción de hojarasca nueva en el BC es baja de $0.45 \text{ Mg C ha}^{-1}$ en comparación con la producción en BP y BO que es de 1.26 y $1.90 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, respectivamente.

En el BE y R2, el carbono almacenado en hojarasca representa el 36% del total encontrado en los residuos vegetales, y en el caso de BE la producción de carbono en hojarasca es de $2.46 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, visiblemente mayor en comparación a los sistemas de coníferas. Esto puede deberse a que las especies caducifolias como encinos y arbustos tiran una gran cantidad de hojas durante la época de secas, mientras que las especies perennes como pino, cedro y oyamel

no tiran hojas anualmente, una hoja puede aguantar hasta siete años sobre el árbol, de manera que la copa se va renovando progresivamente (Botanical, 2010).

El contenido de carbono en los materiales orgánicos de los ecosistemas establecidos en el área reforestada fueron relativamente bajos, existe diferencia en cuanto al porcentaje de aportación, siendo que en el de 30 años el carbono de la hojarasca representa un 35% del total de carbono en los residuos vegetales y en el de 10 años la aportación de la leña representó también el 35%, probablemente debido a que en el primero la copa arbórea está un poco más grande y en el segundo se encontraron ramas y troncos muertos, dada la alta densidad de población arbórea que se encuentran establecidos.

Cuadro 6. Contenido de carbono en materiales orgánicos sobre el suelo de los ecosistemas del Cerro Tláloc.

Ecosistemas	Hojarasca Nueva*	Hojarasca	Mantillo	Leña	C Total
			Mg C ha ⁻¹		
Reforestado de 30 años			n = 3		
Promedio		1.94 ± 0.12	2.84 ± 0.47	0.69 ± 0.29	5.47 ± 0.85
Rango		2.17 - 1.63	4.05 - 2.18	1.45 - 0.30	7.67 - 4.14
Reforestado de 10 años	---n = 3---		n = 3		
Promedio	0.161 ± 0.07	0.81 ± 0.11	2.04 ± 0.18	1.54 ± 0.15	4.39 ± 0.18
Rango	0.064 - 0.33	1.10 - 0.62	2.50 - 1.70	1.94 - 1.25	4.85 - 4.05
Bosque de encino	---n = 5---		n = 6		
Promedio	3.38 ± 1	3.82 ± 0.45	6.27 ± 1.08	0.57 ± 0.11	10.66 ± 1.24
Rango	6.86 - 0.26	5.98 - 2.45	10.41 - 4.35	1.27 - 0.17	15.44 - 4.99
Bosque de cedro	---n = 3---		n = 3		
Promedio	0.45 ± 0.15	2.69 ± 0.72	13.19 ± 2.30	0.89 ± 0.40	16.77 ± 3.19
Rango	- -	3.95 - 0.82	19.18 - 8.19	1.93 - 0.19	25.07 - 12.36
Bosque de oyamel	---n = 5---		n = 6		
Promedio	1.897 ± 0.33	1.44 ± 0.35	10.43 ± 2.50	1.56 ± 0.28	13.43 ± 2.29
Rango	3.049 - 0.86	2.84 - 0.60	27.57 - 4.43	2.66 - 0.50	30.23 - 8.12
Bosque de pino	---n = 5---		n = 6		
Promedio	1.26 ± 0.22	1.17 ± 0.10	4.84 ± 1.33	0.94 ± 0.35	6.95 ± 1.23
Rango	1.86 - 0.5	1.69 - 0.80	11.90 - 0.28	3.50 - 0.15	13.13 - 3.76
Zacatal alpino			n = 4		
Promedio		-	0.28 ± 0.08	-	0.28 ± 0.08
Rango		-	0.47 - 0.12	-	0.47 - 0.12

n=número de sitios de muestreo por sistema. Promedio = Promedio del contenido de carbono por sitios de muestreo por clase. Rango= valores de carbono mínimo y máximo por sitio de muestreo. ± = Error estándar. *= producción anual.

4.2.1 Material en descomposición y su relación carbono/nitrógeno

De acuerdo con Thompson (1988), quien considera que una relación C/N alrededor de 20 a 32:1, constituye el punto de equilibrio óptimo para la descomposición de los materiales orgánicos.

En los ecosistemas de BC y BO se encontró que el material de hojarasca se encuentra dentro de la relación C/N de equilibrio, mientras que en los ecosistemas reforestados de 10 y 30 años muestran la relación más alta. Probablemente se deba a que la vegetación movilice el nitrógeno de las hojas viejas al resto de la planta, tirando hojas con baja concentración de nitrógeno. Si la relación es mayor, parte del nitrógeno del suelo debe ser inmovilizado, si es menor, permite la ocurrencia de una cierta mineralización al tiempo que se descompone la materia orgánica.

La relación carbono/nitrógeno en el mantillo se encontró dentro del punto de equilibrio. Una relación C/N menor de 32 en los residuos orgánicos que se descomponen indica que probablemente tiene lugar una mineralización neta, sin embargo este dato por sí solo, no puede indicarnos la velocidad del proceso (Figura 8).

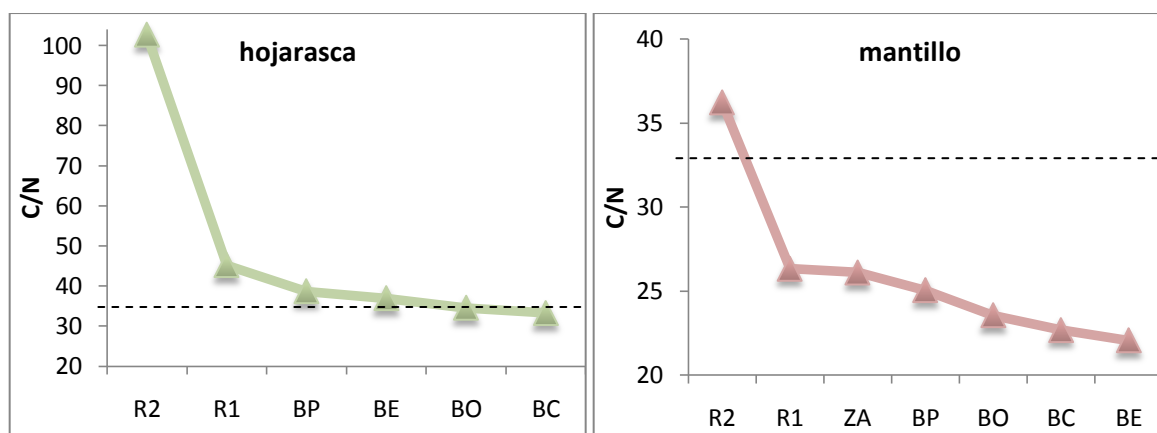


Figura 8. Relación carbono/nitrógeno (C/N) de hojarasca y mantillo en los ecosistemas. R2=reforestado de 30 años, R1=reforestado de 10 años, BP=bosque de pino, BO= bosque de encino, BC=bosque de cedro, BE=bosque de encino, ZA=zacatal alpino.

4.3 CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO (COS)

Como ya se menciona, la suma total del contenido de COS es mayor con respecto a la biomasa y materiales orgánico, siendo de 890.16 Mg C ha⁻¹ (Figura 5). Mientras que entre los ecosistemas el mayor almacenamiento en el suelo fue el zacatal alpino con 184.4 Mg C ha⁻¹ y bosque de pino con 182.8 Mg C ha⁻¹, que representa el 99 y el 70%, con respecto al total de sus almacenes (Cuadro 7).

Cuadro 7. Contenido de carbono del suelo más raíces finas en un perfil de 0-30cm

Ecosistemas	C.O.S		C. raíces finas.		Total	
	-----Mg C ha ⁻¹ -----					
Reforestado de 30 años	----- n = 3 -----					
Promedio	29.45	±13.39	8.40	±3.73	37.85	±12.01
Rango	56.23	-15.81	15.87	-4.53	61.03	-20.83
Reforestado de 10 años	----- n = 3 -----					
Promedio	78.72	±13.24	3.93	±0.81	82.65	±13.08
Rango	101.59	-55.72	5.50	-2.81	104.40	-59.20
Terrenos agrícolas	----- n = 4 -----					
Promedio	59.10	±9.52	1.42	±0.43	60.53	±9.46
Rango	87.24	-45.29	2.17	-0.27	88.48	-47.30
Bosque de encino	----- n = 6 -----					
Promedio	89.70	±7.98	7.40	±0.89	97.10	±7.70
Rango	126.93	-70.94	10.52	-5.51	132.44	-77.25
Bosque de cedro	----- n = 3 -----					
Promedio	123.76	±2.00	12.22	±1.68	135.99	±3.17
Rango	127.47	-120.61	14.83	-9.08	142.30	-132.29
Bosque de oyamel	----- n = 6 -----					
Promedio	98.55	±8.18	10.31	±0.97	108.86	±7.94
Rango	131.19	-72.05	13.79	-8.17	139.36	-83.00
Bosque de pino	----- n = 6 -----					
Promedio	170.69	±13.37	12.11	±1.59	182.80	±13.67
Rango	210.24	-116.22	16.81	-6.81	218.64	-123.03
Zacatal alpino	----- n = 4 -----					
Promedio	177.00	±20.91	7.40	±0.62	184.40	±21.53
Rango	210.30	-121.62	8.38	-5.72	218.62	-127.34

n=número de sitios de muestreo por sistema. Promedio = Promedio por sitios del muestreo por clase. Rango = valores máximos y mínimos por clase. ± = Error estándar.

En los ecosistemas de BO, BC y BE el almacenamiento de COS sólo representa en promedio el 37.7% con respecto al resto de los almacenes evaluados. Siendo la parte vegetativa la que más carbono contiene. Con respecto a los reforestados de 10 y 30 años, el contenido de carbono del suelo representa el 54.8% con

respecto al total del carbono, teniendo una vegetación joven, con potencial de obtener un almacén neto en el transcurso de su desarrollo fisiológico.

Respecto al carbono radical los sistemas de BP, BC y BO, presentaron de 10 a 12 Mg C ha⁻¹ en raicillas. Mientras que el sistema de BE sólo obtuvo 7 Mg ha⁻¹ de carbono en raicillas (Cuadro 7); Báez-Pérez *et al.* (2007), reporta que estos ecosistemas se encuentran en suelos de tepetate, que limita el desarrollo radical.

4.3.1 Carbono orgánico en el perfil del suelo

En la Figura 9 se observa el COS a diferentes profundidades en el perfil del suelo (0-10, 10-20, 20-30 y 30-40 cm), en general, se observa una mayor concentración de COS en los primeros 10 cm de todos los ecosistemas. En suelos ácidos, las acumulaciones de materia orgánica en la superficie son moderadamente lábiles (Anderson 1991), efecto que se observa en ZA y BP donde el carbono sólo disminuye 10 Mg C ha⁻¹ tanto a 20cm como a 30cm de profundidad con respecto al encontrado a los 10 cm.

En los sistemas de BC y BO a los 20 cm de profundidad el carbono disminuye en 14 Mg C ha⁻¹, y a los 30 cm de 11 a 15 Mg C ha⁻¹. Sin embargo, en los sistemas de R1 y BE se observa a los 20 cm de profundidad que hay una disminución mayor de carbono en relación al resto de los ecosistemas y que es de aproximadamente 19 a 29 Mg C ha⁻¹, mientras que a los 30 cm es de 3 a 4 Mg C ha⁻¹.

Respecto a los terrenos agrícolas, se calculó que perdió entre 20 a 30 Mg C ha⁻¹ que representan entre un 27 a 32 % respecto a los ecosistemas naturales ubicados a la misma altitud por el cambio de uso de suelo, éste resultado se asemeja al reportado por Buringh (1984) que fue de 48 a 28 % en pastizales, y el 35% en tierras de cultivos agrícolas, mientras que Harmon *et al.*, (1990) reporta una reducción de 38, 44 y 51% en un tiempo de 50, 75 y 100 años en suelos donde fueron bosques de coníferas de aproximadamente 250 años de antigüedad. En el caso del estudio, los comuneros reportan de 50 a 70 años de antigüedad de cambio de uso de suelo donde fueron bosques mixtos de encino-pino.

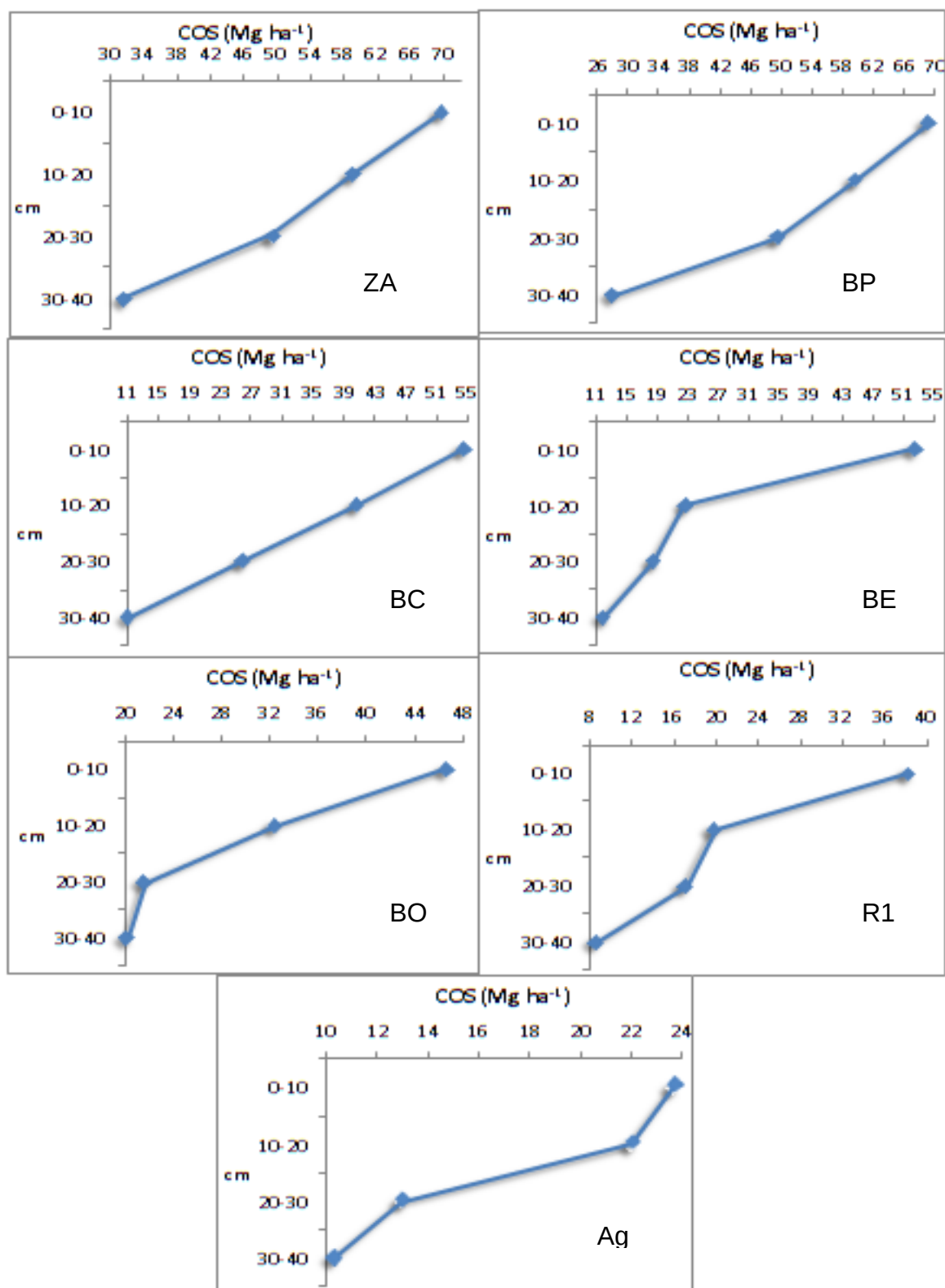


Figura 9. Carbono orgánico (COS) de los perfiles del suelo en ecosistemas del Cerro Tláloc. ZA= zacatal alpino, BP=bosque de pino, BC=bosque de cedro, BE=bosque de encino, BO=bosque de oyamel, R1=reforestado de 10 años, Ag=terrenos agrícolas, Profundidad=cm

4.3.2 Carbono y características del suelo

En el área de estudio la textura a lo largo del gradiente altitudinal indicó suelos franco arenosos en ZA, pasando por francos en los sistemas forestales BP, BO y BC, francos arcillo arenoso en BE y en la parte baja dominan las texturas franco arcillosas, esto es en los sistemas R2, R1, y Ag, que concuerda con lo indicado por Martínez (2010).

En el estudio, la densidad aparente (Dap) es importante para el cálculo de COS en un perfil de suelo. Considerando que la diferencia de la Dap y la Dap ajustada (eliminado residuos, piedras y raicillas) no es grande, se observó que sin eliminar las piedras y residuos los contenidos de COS se ven sobrestimados en 15.5 Mg ha⁻¹ del promedio total de COS determinado en éste estudio (Figura 10).

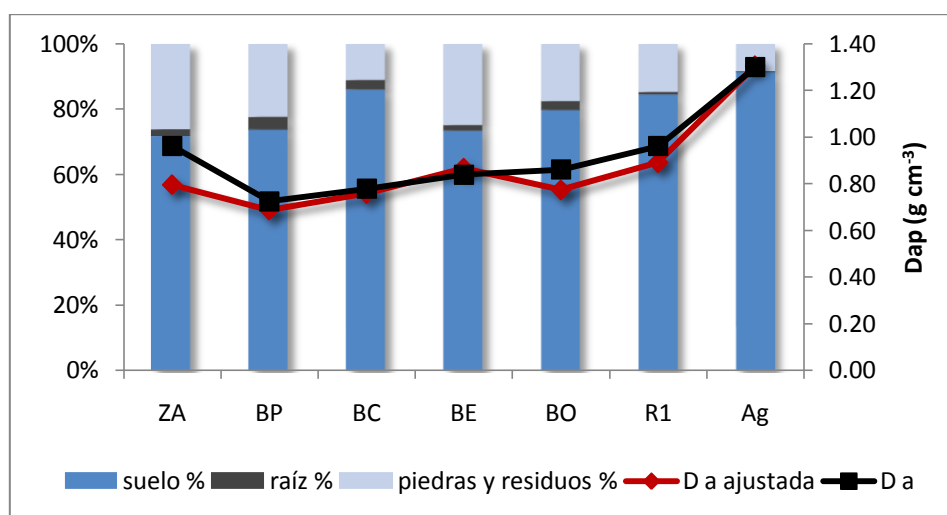


Figura 10. Contenido de suelo, raíces y piedras en la densidad aparente (Dap) y la densidad aparente ajustada (Dap ajustada) en los ecosistemas del Cerro Tláloc. ZA=zacatal alpino, BP=bosque de pino, BC=bosque de cedro, BE=bosque de encino, BO=bosque de oyamel, R1=reforestado de 10 años y Ag=terrenos agrícolas.

Sin embargo en el estudio se observó que un 56% de la variación de la densidad aparente está relacionada con el carbono orgánico del suelo (Figura 11); esto puede deberse a que existe una estrecha correlación entre las cantidades de materia orgánica y el contenido COS y es conocido que la materia orgánica del

suelo hace descender la densidad aparente, ya que es mucho más ligera que el material mineral.

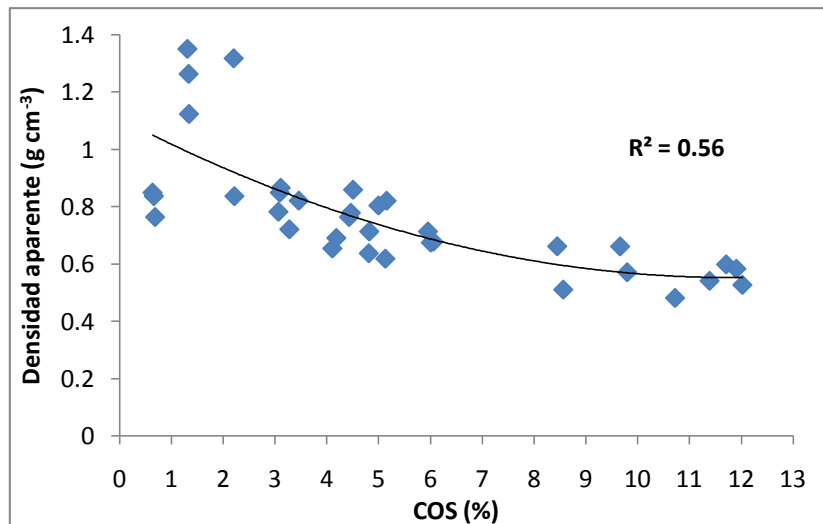


Figura 11. Relación de la densidad aparente y el carbono orgánico del suelo (COS) de 0-30cm, en los ecosistemas del Cerro Tláloc.

Con respecto al pH del suelo, los ecosistemas presentaron suelos muy ácidos (5.34) en ZA, BP y BE, moderadamente ácido (5.65) en BO y Ag, ligeramente ácido (6.5) en R1, BC y R2. Sánchez *et al.*, (2006) reporta valores de pH que varían de 5.5 a 7.1, esto es de muy ácidos a ligeramente ácidos, sin embargo, Martínez (2010), reporta suelos fuertemente ácidos a moderado de 4.56 a 5.73 en el área de estudio.

También se encontró que el pH y el carbono obtuvieron una asociación del 34% (Figura 12); esto puede deberse a que en el proceso de extracción del carbono mediante los microorganismo (humificación) en los materiales orgánicos, se producen ácidos orgánicos, así también el suelo incrementa su acidez mediante procesos naturales; como resultado de la lixiviación de bases, provocado por el agua que se filtra en el perfil del suelo. En el estudio el mayor contenido de carbono se encuentra en suelos muy ácidos y en la parte alta del cerro Tláloc donde se reporta precipitación más frecuentes en comparación de la parte baja del área de estudio.

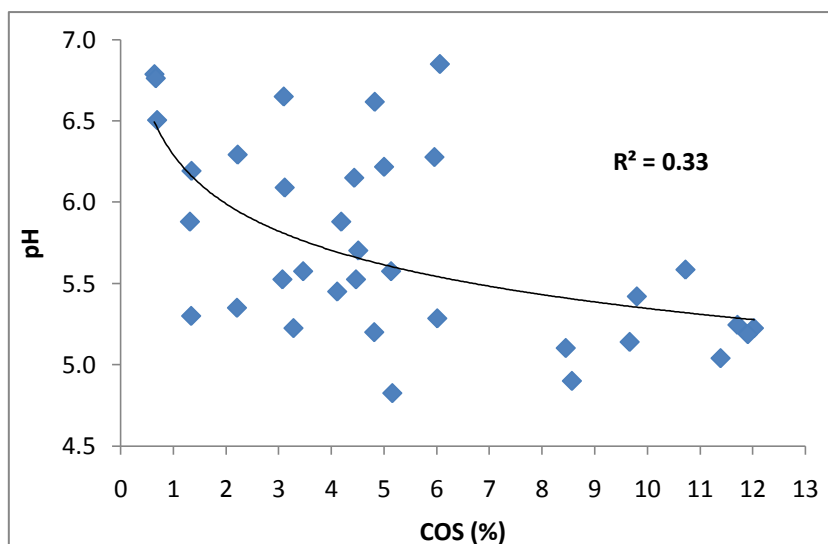


Figura 12. Relación de pH y el carbono orgánico del suelo (COS) de 0-30cm, en los ecosistemas del Cerro Tláloc.

En cuanto a la capacidad de intercambio catiónico (CIC), se sabe que ésta depende de la estructura complejo arcilla/humus, del tipo de micela presente y de la cantidad de materia orgánica incorporada en el suelo. Gliessman (2002) reporta que la materia orgánica es más efectiva que la arcilla para incrementar la CIC, ésta posee una superficie más extensa en cuanto a la relación área/volumen y por su naturaleza coloidal, así también el contenido de carbono en el suelo se encuentra estrechamente correlacionado con la materia orgánica. En el presente estudio se obtuvo una relación alta entre CIC y el COS, el 70% de la variabilidad de la CIC estuvo asociada al COS, como se muestra en la Figura 13. Los ecosistemas con mayor capacidad de intercambio catiónico son el bosque de pino y bosque de cedro (48.7 meq 100g), el menor fue el agrícola (14.2 meq 100g).

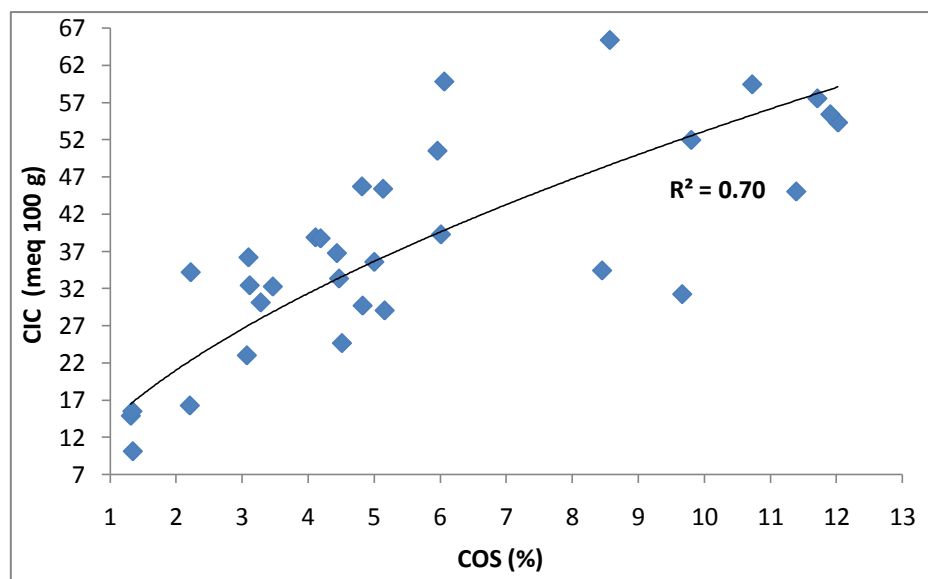


Figura 13. Relación de capacidad de intercambio catiónico (CIC) y el carbono orgánico del suelo (COS) de 0-30cm, en los ecosistemas del Cerro Tláloc.

Respecto al contenido de nitrógeno inorgánico (N) y fósforo disponible (P), considerando los indicadores de Castellanos *et. al.* (2000); el área agrícola tuvo un alto contenido de N y P, el nitrógeno representa una aportación de 110 Mg ha⁻¹ y el fósforo de 84 Mg ha⁻¹ en las profundidades de 0-30cm, sin embargo, este sistema es pobre tanto en materia orgánica y por consecuente en COS. Las concentraciones elevadas de N y P encontradas pueden ser atribuidas al manejo agrícola, donde se emplean insumos y formulaciones nutritivas.

Las figuras 14 y 15 muestran el grado de asociación del COS con N y P evaluados en el perfil de suelo de 0-30cm en los ecosistemas, con respecto al nitrógeno y fósforo es baja con 4 y 9 por ciento respectivamente.

Esto puede deberse a que en el área de estudio se encuentran ecosistemas naturales y degradados, En los sistemas naturales, nutricionalmente los suelos se catalogan como de fertilidad moderada (Castellanos *et. al.*, 2000). El N en la mayoría de los ecosistemas se encuentra en niveles medios, el mayor contenido se encontró en ZA con 31 mg kg⁻¹ que representa 62 Mg N ha⁻¹, excepto en ecosistema R2 que es ligeramente bajo. En el caso del P, la mayoría de los ecosistemas se encuentran en concentraciones bajas a excepción de BO y BE

que presentan una concentración media de 12 mg kg^{-1} que es de aproximadamente 26 Mg P ha^{-1} (ver anexo 2).

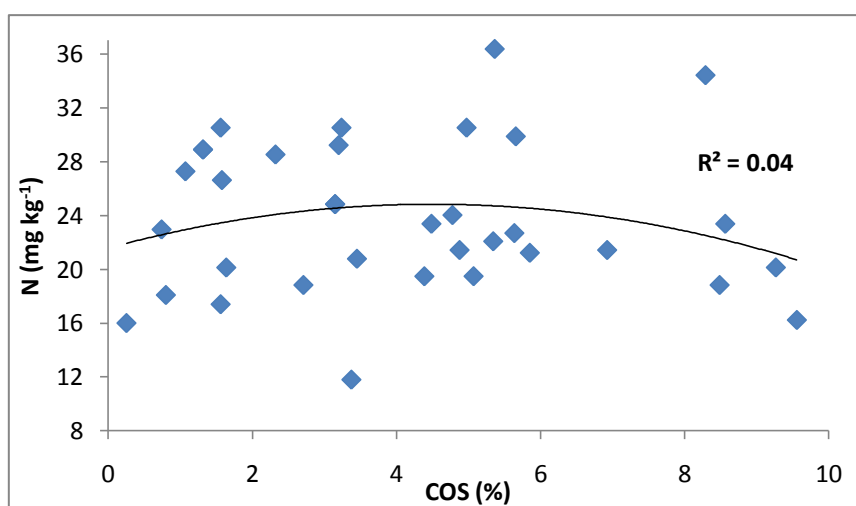


Figura 14. Relación nitrógeno (N) y carbono orgánico del suelo (COS) de 0-30cm, en los ecosistemas del Cerro Tláloc.

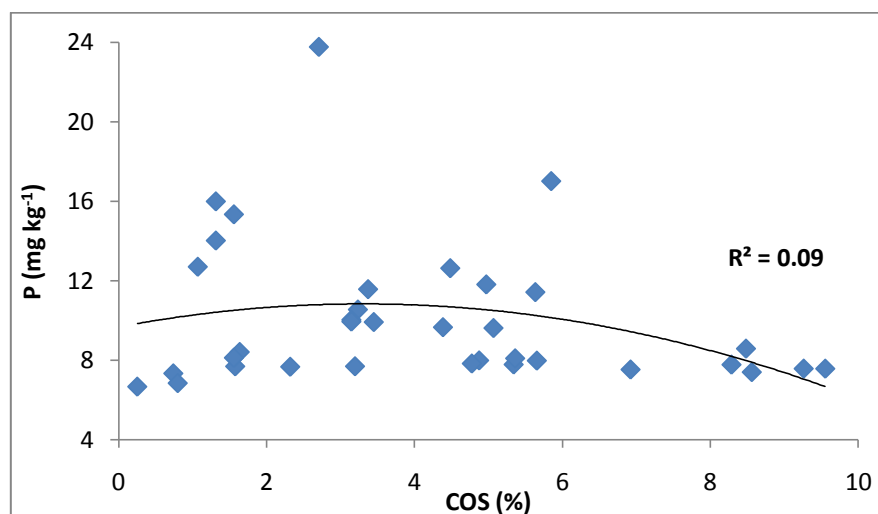


Figura 15. Relación fósforo (P) y carbono orgánico del suelo (COS) de 0-30cm, en los ecosistemas del Cerro Tláloc.

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De los resultados de éste trabajo, se plantea las siguientes conclusiones.

5.1 CONCLUSIONES

- Se concluye que el área de estudio es un importante sumidero de carbono tanto en la vegetación como el suelo, con gran potencial de incrementar la tasa de acumulación mediante un aprovechamiento sustentable.
- Los ecosistemas forestales obtuvieron mayor contenido de carbono (bosque de oyamel con $334.43 \text{ Mg C ha}^{-1}$) aportado por la biomasa en un 50 a 64% del total.
- La productividad del bosque y la calidad de los residuos orgánicos contribuyen en forma significativa en la acumulación de carbono, obteniendo mejores relaciones carbono y nitrógeno en los ecosistemas forestales de estudio.
- El mayor contenido de carbono se encontró en los primeros 20cm de espesor del suelo con texturas franco arenoso y en los primeros 10cm de espesor en suelos con texturas franco arcilloso.
- La densidad aparente de los suelos del área de estudio está altamente correlacionada con la materia orgánica y ésta con el contenido de carbono en el suelo (56% asociación).
- La presencia de carbono y su relación con la materia orgánica determinó un mayor potencial de capacidad de intercambio catiónico del suelo de los ecosistemas (70% de asociación)
- Los suelos con mayor contenido de carbono presentaron pH fuertemente ácidos, que puede ser por los procesos de humificación de los materiales orgánicos (33% de asociación), en tanto la variación del carbono con el nitrógeno y fósforo resultó baja (4 y 9%).

5.2 RECOMENDACIONES

Con base en las anteriores conclusiones y la experiencia obtenida en esta investigación, se plantea las siguientes recomendaciones.

- Las bases generadas de contenidos de carbono en los diferentes almacenes, son datos que sirven para gestionar y brindar el servicio ambiental de captura de

carbono en México ante el Consejo Nacional Forestal (CONAFOR) y el programa de las Naciones Unidas de reducción de emisiones por deforestación (REDD+México), como también ofertar el servicio fuera del país a través del mercado voluntario de carbono, ya que los ecosistemas del cerro Tláloc, cuentan con un gran potencial para mitigar el cambio climático y aun más para las zonas conurbadas del municipio y de la región en general.

- Si bien, el estudio consistió en medir el contenido de carbono en los almacenes en diferentes ecosistemas, paralelamente se puede realizar estudios de emisión de CO₂ y la producción neta de carbono en el Cerro Tláloc.
- Estos datos sirven para alimentar modelos de simulación de carbono en sistemas forestales a una escala regional.
- Se recomienda obtener ecuaciones alométricas de las especies forestales del área de estudio, ya que las condiciones edafoclimáticas específicos del lugar determinan el desarrollo fisiológico de la población arbórea, así como también considerando las variables indispensables (diámetro a la altura del pecho, densidad de la madera y altura del árbol) para obtener un dato confiable.
- Es necesario desarrollar un manejo agroforestal en los terrenos de uso agrícola, con la finalidad de incrementar la captura de carbono, como también la producción para fines alimenticios.

6 LITERATURA CITADA

- Acosta M., M., J. D. Etchevers B., K. Quednow y C. Monreal. 2001. Un método para la medición de captura de carbono almacenado en la parte aérea de sistemas con vegetación natural e inducida en terrenos de ladera en México. In: Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales. 18 al 20 de Octubre de 2001. Valdivia, Chile. 11 p.
- Adame M., S. Martínez M., M. R. 1999. Efecto del manejo integral de la cuenca del río Texcoco, sobre la producción de agua y sedimentos. Investigaciones geográficas. Boletín 39. 53-67 pp.
- Aguirre, D. C. M. 2006. Servicios Ambientales: Captura de carbono en sistemas de café baja sombra en Chiapas, México. 85 pp.
- Ahedo R. 2000. Estimación de biomasa radical y almacenes de carbono en los Tuxtlas Veracruz, México: los cambios de uso del suelo. Tesis de licenciatura, Facultad de ciencias UNAM, México, p.
- Alegre J.; A. Ricse; L. Arévalo; J. Barbarán; C. Palm. 2000. Reservas de carbono en diferentes sistemas de uso de La tierra en la amazonia peruana. CODESU. Boletín informativo. 12:8-12.
- Anderson, J.M. 1991. The effects of climate change on decomposition processes in grassland and coniferous forest. Ecol. Appl. 1: 326–347 pp.
- Apps, M. J.; W.A. Kurz; R. J. Luxmoore; L.O. Nilsson; R. A. Sedjo; R. Schmidt; L. G. Simpson y T.S. Vinson. 1993. Boreal Forest and Tundra. In: Wisniewski, J. y R.N. Sampson (Eds). Terrestrial Biospheric Carbon Fluxes: Quantification and Sources of CO₂ Kluwer Academic Publishers. Holanda. pp.39-53.
- Ávila, G., F. Jiménez, J. Beer, M. Gómez, y M. Ibrahim. 2001. Almacenamiento, fijación de carbono y valoración de servicios ambientales en sistemas agroforestales en Costa Rica. Agroforestería en las Américas 8(30):32-35.
- Avilés-Hernández, V. ; A. Velázquez-Martínez; G. Ángeles-Pérez; J. Etchevers-Barra; H. De los Santos-Posadas; T. Llanderal. 2009. Variación en almacenes de carbono en suelos de una Toposecuencia. Agrociencia, 43(5), pp. 457-464.
- Báez-Pérez A.; Etchevers-Barra J.D.; Prat C y Hidalgo-Moreno C. 2007. Formation of aggregates and carbon sequestration in ameliorated tepetates in the río Texcoco basin, Mexico. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, año/vol. 24, número 003. Universidad Nacional Autónoma de México. 487-497 pp.
- Bellón, M.R., O.R. Maser y G. Segura 1993. Response options for sequestering carbon in Mexican forests. Reporte al F-7 International Network on tropical Forestry and Global Climatic Change, Energy and Environment Division, Lawrence-Berkeley Laboratory, Environmental Protection Agency, Berkeley.

- Botanical, 2009. Coníferas. (En línea. Consultado 20 de abril 2009. Disponible en <http://www.botanical-online.com/coniferas.htm>.)
- Brown, S, 1997. Los bosques y el cambio climático: el papel de los terrenos forestales como sumideros de carbono. Turquía: Congreso Forestal Mundial. 107-121pp.
- Brown, S.; A. Lugo. 1984. Biomass of tropical forest anew estimate based on forest volumes. *Science* 223: 1290-1293.
- Brown, S.; Ch. Hall; W. Knabe; J. Raich; M. Trexler; P. Woormer. 1993. Tropical Forest: their past, present and potential future role in the terrestrial carbon budget. *Water air and Soil Pollution*. No. 70 pp71-94.
- Buringh, P. 1984. Organic carbon in soils of the world. Pages 91-109 in G. M. Woodwell, editor. *The role of terrestrial vegetation in the global carbon cycle*. Scientific Committee on Problems of the Environment Publication 23. John Wiley and Sons, Chichester, England. En Anderson, J.M. 1991. The effects of climate change on decomposition processes in grassland and coniferous forest. *Ecol. Appl.* 1: 326–347 pp.
- Callo, C. D. A. 2001. Cuantificación del carbono secuestrado por algunos sistemas agroforestales y testigos en tres pisos ecológicos de la Amazonía del Perú. 72 pp.
- Campos, M., R.N. Sampson y O.R. Masera. 1995. Greenhouse gases mitigation analyses in the forestry and agriculture sectors. *Interciencia* 20(6): 423-425.
- Carter, M.R., E.G. Gregorich, D.W. Anderson, J.W. Doran, H.H. Janzen y F.J. Pierce. 1997. Concepts of soil quality and their significance. pp. 1-19. In: Gregorich, E.G. y M. Carter (eds.). *Soil quality for crop production and ecosystem health*. Elsevier Science Publishers. Amsterdam, The Netherlands.
- Castellanos J. X. 2000. Manual de interpretación de análisis de suelos y agua. Ed. INCAPA 2000. 226 pp.
- Concha, J. Y.; J. C. Alegre; V. Pocomucha. 2007. Determinación de las reservas de carbono en la biomasa aérea de sistemas agroforestales de *Theobroma cacao* L. en el departamento de San Martín, Perú. *Ecología aplicada*, 6(1-2) pp.75-82.
- Consejo Civil Mexicano para la Silvicultura Sostenible (CCMSS). 2008. Tramitología: un fuerte obstáculo para el sector forestal de México. Red de monitoreo de políticas públicas. Núm. 19. 6 pp.
- Davidson, E. A. & I. A. Janssens. 2006. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature* 445: 10-38 pp.
- De Jong H.J., B., Tipper, R. y Soto P., L. 2005. Proyecto Scolel Té: la participación de las comunidades rurales en el mercado internacional de venta de

- carbono. Obtenida el 10 de Octubre de 2008. (En línea). Disponible en <http://www.ine.gob.mx/publicaciones/libros/437/scolelte.html>
- De Jong, B.H., M.A. Cairns, P.K. Haggerty, N. Ramírez-Marcial, S. Ochoa-Gaona, J. Mendoza-Vega, M. González-Espinosa, I. March-Mifsut. 1999. Land-Use change and carbon flux between 1970s and 1990s in central highlands of Chiapas, Mexico. *Environ. Manage.* 23: 373-385.
- Delgadillo R., M. y Quechulpa M., Sotero. 2006. Manual de monitoreo de carbono en sistemas agroforestales. Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) programa de Investigación y Desarrollo Tecnológico, AMBIO S.C de R.L. Chiapas. México.
- Dixon, R.K.; S. Brown; R.A. Houghton; A.M. Solomon; M. C. Trexler; J. Wisniewski. 1994. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*. No. 263 pp.185-190.
- Egli, M.; C. Merkli; G. Sartori; A. Mirabella; M. Plötze. 2008. Weathering, mineralogical evolution and soil organic matter along a Holocene soil toposequence on carbonate-rich materials. *Geomorphology* 97, 675–696.
- Eswaran, H., E. V. Den Berg, and P. Reich. 1993. Organic carbon in soils of the world. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 192-194.
- Etchevers B., J. D., M. Acosta M., C. Monreal, K. Quednow y L. Jiménez. 2001. Los stocks de carbono en diferentes compartimientos de la parte subterránea en sistemas forestales y agrícolas de ladera en México. In: Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales. 18 al 20 de Octubre de 2001. Valdivia, Chile. 19 p.
- Etchevers B., J. D.; Monreal C. M.; Hidalgo M., C.; Acosta M., M.; Padilla C., J.; López R., R. Ma. 2005. Manual para la determinación de carbono en la parte aérea y subterránea de sistemas de producción en laderas. Colegio de Posgraduados. México 29 pp.
- Etchevers B., J.D.; Núñez E., R.; Báez P., A.; Hidalgo M., C.; Pat C. y Ordaz Ch., V. 2002. C orgánico y P-olsen en tepetates cultivados de México. *Agrociencia*, noviembre-diciembre, año/vol. 36, Núm. 006. Colegio de Postgraduados, Texcoco, México. 643-653 pp.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2006. Global Forest Resources Assessment 2005: Progress towards sustainable forest management. FAO Forestry paper. Rome Italy, 350p.
- Gliessman S. R. 2002. Agroecology: ecological processes in sustainable agricultura. Ed. Eric Engles. Turrialba, Costa Rica. 359 pp.
- Gómez-Tagle, A.; Y. Chávez-Huerta; L. M. Morales-Manilla; E. Díaz-Fernández; A. F. Gómez-Tagle; H. Zepeda-Castro. 2003. Predicción especial de carbon organic edáfico superficial en zonas forestales mediante análisis digital de terrenos y SIG: uso de la radiación potencial. *Foresta Veracruzana*, 5(2) 49-56.

- Harmon, M. E., G. A. Baker, G. Spycher, and S. Greene. 1990. Leaf-litter decomposition in *Picea-Tsuga* forests of Olympic National Park, Washington, USA. *Forest Ecology and Management* 31:55-66. En Anderson, J.M. 1991. The effects of climate change on decomposition processes in grassland and coniferous forest. *Ecol. Appl.* 1: 326–347 pp.
- Hoen, H.; B. Solberg. 1994. Potential and economic efficiency of carbon sequestration in forest biomass through silvicultural management. *Forest Science* 3: 429-451.
- Hughes, R.F.; J.B. Kauffman; V.J. Jaramillo. 1999. Biomass, carbon and nutrients dynamics of secondary forest in a humid tropical region of Mexico. *Ecology* 80(6): 1892-1907.
- Hughes, R.F.; J.B. Kauffman; V.J. Jaramillo. 2000. Ecosystem-scale impacts of deforestation and land use in a humid tropical region of Mexico. *Ecological Applications*. 10:515-527.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). 2009. Uso potencial de la tierra. (En línea. Consultado 17 de abril 2009. Disponible en <http://mapserver.inegi.gob.mx>).
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2001: Climate Change 1995: Impacts, Adaptations, and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses. Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Watson, R.T., M.C. Zinyowera and R.H. Moss (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge y New York, 880 pp.
- IPCC, 2003: Definitions and Methodological Options to Inventory Emissions from Direct Human-Induced Degradation of Forests and Devegetation of Other Vegetation Types [Penman, J. y colaboradores (directores de la publicación)]. The Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Japón, 32 págs.
- IPCC, 2007: Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 104 págs.
- Janish, J. E., and M. E. Harmon 2002. Successional changes in live and dead wood carbon stores: implications for ecosystem productivity. *Tree Physiology* 22: 77-89.
- Kyrklund, B. 1990. Cómo pueden contribuir los bosques y las industrias forestales a reducir el exceso de anhídrido carbónico en la atmósfera. *Unasylva*. 43(163): 12-14.
- Lal, R. 2007. World soils and global issues. *Soils Tillage Res.* 97: 1-4.

- Lal, R., J. Kimble, R. Follet y B.A. Stewart 1998. Soil processes and the carbon cycle. CRC Press. Boca Raton, FL.
- Lapeyre, T.; J. Alegre; L. Arévalo. 2004. Determinación de las reservas de carbono de La biomasa aérea, en diferentes sistemas de uso de la tierra en San Martín,. *Ecología Aplicada*, 3(1-2) pp.35-44.
- Law, B. E., O. J. Sun, J. Campbell, S. Van Tuyl, and P. E. Thornton. 2003. Changes in carbon storage and fluxes in a chronosequence of ponderosa pine. *Global Change Biol.* 9: 510-524.
- Márquez, L. 2000. Elementos técnicos para inventarios de carbono. Fundación Solar, Guatemala.
- Martínez R., V. 2010. Almacenamiento de carbono en los sistemas forestales y agrícolas de la falda oeste del cerro del Tláloc. Posgrado en Maestría en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco. México. 30 pp.
- Masera, O. 1995. "México y el cambio climático global: El papel de la eficiencia energética y alternativas de manejo forestal en la reducción de emisiones de bióxido de carbono". En: Juan J. Jardón (ed.). *Energía y medio ambiente: Una perspectiva económico-social*. Plaza y Valdés Editores, México, pp 157-177.
- Mizota, C. y P. van Reeuwijk. 1989. Clay mineralogy and chemistry of soils formed in volcanic material in diverse climatic regions. *International Soil Reference and Information Centre. Soil Monograph* 2, 103p.
- Ordóñez, J.A.B. y O. Masera. 2001. Captura de carbono ante el cambio climático. *Madera y Bosques*, 7:1 pp.3-12
- Ordóñez-Díaz, J. A. B. 2008. Cómo entender el manejo forestal, la captura de carbono y el pago de servicios ambientales. *Ciencias*, 90, pp. 37-42
- Ortiz-Ceballos, G. 2004. El agroecosistema café: crisis de mercado y sustentabilidad. Tesis de Doctorado en Ciencias, Programa en Agroecosistemas tropicales. Colegio de Posgraduados, México. 125p.
- Peña-Ramírez V. M.; Vázquez-Selem L.; Siebe C. 2009. Soil organic carbon stocks and forest productivity in volcanic ash soils of different age (1835–30,500 YEARS B.P.) IN MEXICO. *journal Geoderma* 149. pp 224–234
- Pérez-García, N.; M. Rueda-González; G. E. Rojo-Martínez; R. Martínez-Ruíz; B. Ramírez-Valverde; J.P. Juárez-Sánchez. 2009. El bambú (*Bambusa* spp.) como sistema agroforestal: una alternativa de desarrollo mediante el pago por servicios ambientales en la sierra nororiental del estado de Puebla. *Ra Ximhai*, Vol. 5(3): 335-346.
- Pineda-López, M.R.; G. Ortiz-Ceballos; L.R. Sánchez-Velásquez. 2005. Los cafetales y su papel en la captura de carbono: un servicio ambiental aún no valorado en Veracruz. *Madera y Bosques* 11(2) 3-14.

- Post, W. M., T. H. Peng, W. R. Emanuel, A. W. King, V. H. Dale and D. L. DeAngelis. 1990. The global carbon cycle. *Am. Scientist* 78: 310-326.
- Ramírez O.; M. Gómez; S. Shultz. 1997. Valuing the contribution of plantation forestry to the national accounts of Costa Rica from the ecological economics perspective. *Beijer Research Seminar*. Costa Rica. 28p.
- Rodríguez-Tapia, S.; Ortiz-Solorio, C. A.; Hidalgo-Moreno, C; Gutiérrez-Castorena, M. C. 2004. Los tepetates de la ladera oeste del cerro del Tlálloc: saprolita, sin endurecimiento pedológico. *Terra Latinoamericana*, Vol. 22, Núm 1, enero-marzo, 2004, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México. 11-21pp.
- Rojo-Martínez, G.E.; J. Jasso-Mata; A. Velásquez-Martínez. 2003. Las masas forestales como sumideros de CO₂ ante un cambio climático global. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente*. 9(01):57-67.
- Ruiz, G. A. 2002. Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas silvopastoriles y competitividad económica en Matiguás, Nicaragua. CATIE. Turrialba Costa Rica. 106 pp.
- Rzedowski, J., 2006. Vegetación de México. 1ra. Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México, 504 pp.
- Rzedowski. 1985. Flora fanerogámica del Valle de México, Instituto Nacional de ciencias biológicas, Instituto de Ecología, México D.F.
- Sánchez G., A. López M., L. 2003. Clasificación y ordenación de la vegetación del norte de la Sierra Nevada, a lo largo de un gradiente altitudinal. Instituto de Biología. Series Botánica, enero-junio, año/vol. 74, número 001. Universidad Nacional Autónoma de México, México. 47-71 pp.
- Sánchez G., A.; López M., L.; Vibrans H. 2006. Composición y patrones de distribución geográfica de la flora del bosque en oyamel del cerro Tlálloc, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, diciembre, número 079. Sociedad Botánica de México, A.C. Distrito Federal, México. 67-78 pp.
- Schlesinger, W. 1991. Biogeochemistry. An analysis of global change. Academic Press Inc. San Diego, Cal. USA. 588 p.
- Schwager, S.J. y E.A. Mikhailova. 2002. Estimating variability in soil organic carbon storage using the method of statistical differentials. *Soil Sci.* 167: 194-200.
- Segura-Castruita, M. A.; P. Sánchez-Guzmán; C. A. Ortiz-Solorio; M. C Gutiérrez-Castorena. 2005. Carbono orgánico de los suelos de México. *Terra Latinoamericana*, 23(1) pp. 21-28
- SEMARNAT. 2008. El pago por servicios ambientales ha beneficiado a miles de comunidades que viven en los bosques. Comunicado de prensa Núm. 187/08. Obtenido el 19 de Octubre de 2008. (En línea). Disponible en <http://www.semarnat.gob.mx/saladeprensa/boletindeprensa/Pages/Bol%202008%20187.aspx>.

- Shoji, S.; M. Nanzyo; R.A. Dahlgren. 1993. Volcanic ash soils, genesis, properties and utilization developments. Soil Science, 288p.
- Smith D.L. y Almaraz J.J. 2004. Climate change and crop production: contributions, impacts, and adaptations. Can. J. Plant Pathol. 26: 253-266.
- Swift, R.S. 2001. Sequestration of carbon by soil. Soil Science. 166:858-871.
- Tapia-Varela G. y López-Blanco J. 2001. Mapeo geomorfológico analítico de la porción central de la cuenca de México: unidades morfogénicas a escala 1:100,000. Departamento de Geografía Física, Instituto de Geografía, UNAM, México, D.F. 50-65 pp.
- Thompson L. M; Troeh F. R. 1988. Soils and fertility. Fourth edition. MacGraw-Hill, Inc. Book Company, New York. 299-312 pp.
- Thoranisorn, S.; P. Sahunalu; K. Yoda. 1991. Litterfall and productivity of *Eucalyptus camadulensis* in Thailand, Jurnal of Tropical Ecology. 7(2): 275-279.
- Trexter, M.C. y C. Haugen 1995. Keeping it green: tropical Forestry opportunities for mitigating climate change. WRI, EPA. 52 pp.
- Vargas-Mena, A. y A. Yáñez-Sandoval. 2004. La captura de carbono en bosques: ¿una herramienta para la gestión ambiental? Gaceta Ecológica. 70 pp.5-18.
- Vergara-Sánchez, M. A; J. Etchevers-Barra; M. Vargas-Hernández. 2004. Variabilidad del carbono orgánico en suelos de ladera del sureste de México. Terra Latinoamericana, 22(3), pp. 359-367.
- W.H.O. Ernst 2004. Vegetation, organic matter and soil quality. Chapter 3. Developments in Soil Science, Volume 29. 41-98 pp.
- Woomer, P.L. y C.A. Palm. 1998. An approach to estimating system carbon stocks in tropical forests and associated land uses. Commonw. For. Rev. 77: 181-190.
- WRI (World Resource Institute), 2001: World Resources 2000-2001. World Resources Institute, Washington, D.C. USA, 315 pp.
- Yarza de la T., E. 2003. Los volcanes del sistema volcánico transversal. Investigaciones geográficas. Boletín del Instituto de Geografía. Núm. 50. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 220-234 pp.

Anexo 1. La materia orgánica del suelo y su relación con algunas características físicas del suelo evaluadas en un perfil de 0 a 30 cm de profundidad.

Clase	Textura	D. ap (gr cm⁻³)	W %	Porosidad %	M.O.S %
Reforestado de 30 años	Franco arcillo arenoso			N = 3	
promedio		0.956 ±0.052	26.64 ±1.20	63.91 ±1.98	2.05 ±0.91
Reforestado de 10 años	Franco arcilloso			N = 3	
promedio		0.891 ±0.014	26.64 ±1.20	66.39 ±0.53	5.6 ±1.11
Uso agrícola	Franco arcilloso			N = 4	
promedio		1.306 ±0.049	13.78 ±3.18	50.72 ±1.84	2.67 ±0.38
Bosque de encino	Franco y franco arenoso			N = 6	
promedio		0.866 ±0.028	23.86 ±3.15	67.3 ±1.07	8.18 ±1.23
Bosque de cedro	Franco			N = 3	
promedio		0.758 ±0.025	23.93 ±4.11	71.39 ±0.96	9.78 ±0.58
Bosque de oyamel	Franco			N = 6	
promedio		0.774 ±0.049	39.34 ±6.82	70.8 ±1.83	8.48 ±1.38
Bosque de pino	Franco y franco arenoso			N = 6	
promedio		0.687 ±0.055	37.82 ±5.71	74.07 ±2.06	17.29 ±1.98
Zacatal alpino	Franco arenoso			N = 4	
promedio		0.796 ±0.024	41.74 ±3.19	69.97 ±0.90	15.53 ±2.12

D. ap.= densidad aparente W = humedad gravimétrica. M.O.S. = materia orgánica del suelo. N=numero de sitios de muestreo por sistema. Promedio = Promedio por sitios del muestreo por clase. ± = Error estándar.

Anexo 2. Características químicas del suelo a 0-30cm y 30-60cm de profundidad.

Ecosistemas	n	pH		CIC (meq 100g)		COS (%)		N (mg Kg ⁻¹)		P (mg Kg ⁻¹)	
		0	30	0	30	0	30*	0	30	0	30
Reorestado de 30 años	3										
Promedio		6.69	±0.09	35.16	±1.18	1.19	±0.53	19.02	±2.06	6.93	±0.20
Rango		6.79	6.51	36.59	32.81	2.24	0.64	22.96	16.00	7.32	6.65
Reforestado de 10 años	3										
Promedio		6.36	±0.15	35.73	±0.78	3.25	±0.64	21.38	±2.73	8.06	±0.21
Rango		6.65	6.15	36.78	34.21	4.43	2.22	26.62	17.40	8.4	7.67
Terrenos agrícolas	4										
Promedio		5.68	±0.22	14.22	±1.39	1.55	±0.22	28.89	±0.66	21.64	±7.01
Rango		6.19	5.30	16.29	10.15	2.21	1.31	30.51	27.27	42.55	12.69
Bosque de encino	6										
Promedio		5.45	±0.19	35.84	±2.62	4.75	±0.72	24.83	±1.86	11.97	±2.39
Rango		6.09	4.83	45.73	29.07	7.92	3.11	30.52	18.83	23.76	7.68
Bosque de cedro	3										
Promedio		6.45	±0.20	48.65	±7.06	5.67	±0.34	20.8	±4.87	8.99	±1.28
Rango		6.85	6.22	59.83	35.59	6.06	5	28.52	11.80	11.56	7.65
Bosque de oyamel	6										
Promedio		5.62	±0.23	38.2	±6.2	4.92	±0.8	22.68	±1.72	11.84	±1.20
Rango		6.62	4.90	65.41	23.03	8.57	3.07	30.52	18.83	17	8.57
Bosque de pino	6										
Promedio		5.37	±0.10	48.84	±5.25	10.03	±1.15	20.34	±0.99	7.93	±0.34
Rango		5.7	5.04	59.46	24.68	12.02	4.51	23.37	16.23	9.6	7.38
Zacatal alpino	4										
Promedio		5.18	±0.04	39.41	±5.78	9.01	±1.23	31.17	±2.74	7.9	±0.07
Rango		5.29	5.10	55.43	28.49	11.91	6.01	36.36	24.02	8.08	7.76

C.O.S. = carbono orgánica del suelo (* por analizador, ** por Walkley y Black). N = nitrógeno inorgánico (KCL 2N). P = Fosforo (Bray P1 y Olsen) N=numero de sitios de muestreo por sistema. Promedio = Promedio por sitios del muestreo por clase. ± = Error estándar