



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
DEPARTAMENTO DE SUELOS



**MAESTRÍA EN AGROFORESTERÍA PARA EL
DESARROLLO SOSTENIBLE**

**ALMACENAMIENTO DE CARBONO EN LOS
SISTEMAS FORESTALES Y AGRÍCOLAS DE LA FALDA
OESTE DEL CERRO TLÁLOC**

TESIS

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

PRESENTA:

VIRGINIA MARTÍNEZ ROJAS

Chapingo, México, Mayo 2010



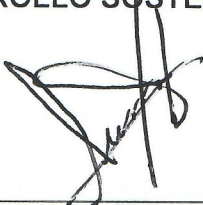
Agroforestería para el
Desarrollo Sostenible

**ALMACENAMIENTO DE CARBONO EN LOS SISTEMAS FORESTALES Y
AGRÍCOLAS DE LA FALDA OESTE DEL CERRO TLÁLOC.**

Tesis realizada por **Virginia Martínez Rojas** 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 AGROFORESTERÍA PARA EL
DESARROLLO SOSTENIBLE**

CODIRECTOR:



DR. JUAN JOSÉ ALMARAZ SUAREZ

CODIRECTOR:



DRA. ELIZABETH HERNÁNDEZ ACOSTA

ASESOR:



DR. ANTONIO VÁZQUEZ ALARCÓN

ASESOR:



M. C. ALEJANDRO ISMAEL MONTERROSO RIVAS

DEDICATORIAS

*A mis padres Tomasa y Javier
por su amor y darme lo único que necesito para ser feliz, “la vida”.*

*A mi Bebe Vanessa Pérez Martínez
que es el amor de mi vida y mi más grande tesoro.*

*Al papá de mi bebe Alejandro Pérez Rosales
que amo con toda el alma*

*A mis hermanos Daniel, Noemi y Javier Iván
por su amor y formar parte de mi vida*

*A mi sobrina Dana Nicol y mi sobrino Daniel
que son un pedacito de cielo*

A la memoria de mis abuelos

AGRADECIMIENTOS

A la UACH por haberme permitido realizar mis estudios de Postgrado en la Maestría en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible.

Al CONACYT por la beca recibida para la realización de mis estudios de Maestría.

A mis Padres Javier G. Martínez Gálvez y Tomasa Rojas Constantino por su cariño y apoyo en todo momento.

Al Dr. Juan José Almaraz Suárez por su asesoría en la elaboración de la presente tesis y por el apoyo financiero para la realización de los muestreos y análisis de muestras.

A la Dra. Elizabeth Hernández Acosta por la revisión de la tesis y apoyo financiero para el análisis de muestras de la presente tesis.

Al Dr. Antonio Vázquez Alarcón por la revisión de la tesis y por las facilidades otorgadas para el acceso y utilización del Laboratorio de Química de Suelos.

Al M. C. Alejandro I. Monterroso Rivas por el apoyo en la elaboración de mapas y la revisión de la tesis.

Al Dr. David Cristóbal Acevedo por las facilidades otorgadas para el acceso y utilización del Laboratorio de Física de Suelos.

Al Ing. Alejandro Pérez Rosales por su apoyo para la realización de los muestreos en campo.

A la Sta. Dolores Coronel por su apoyo durante mi estancia en la Maestría.

Al COMECYT por el apoyo económico para la elaboración de la tesis.

Al Ejido de San Pablo Ixayoc, por facilitar la realización de los muestreos y en especial al Sr. Genaro, Sr. Bonifacio y Sr. Bartolo por su apoyo durante el trabajo de campo. Felicidades por cuidar y conservar su bosque, continúen con esta labor para que siga siendo el pulmón de la zona metropolitana.

DATOS BIBLIOGRÁFICOS

Virginia Martínez Rojas nació en México, D.F. el 26 de diciembre de 1979, hija del Sr. Javier G. Martínez Gálvez y la Sra. Tomasa Rojas Constantino. Segunda hija de 4 hijos. Reside en el municipio de Chicoloapan, México. Comparte el gran viaje de la vida con Alejandro Pérez Rosales y su pequeña niña de 5 meses de edad quien recibe el nombre de Vanessa Pérez Martínez.

Su educación básica la realizó en el municipio de Texcoco, la educación media superior en el CETIS 57 de Iztapalapa. Estudio una carrera técnica de 1998 a 2000, en la Universidad Tecnológica de Nezahualcóyotl en Tecnología Ambiental, realizó su servicio social en la UACH en el Departamento de Fitotecnia dentro del Laboratorio Nutrición de Frutales y su estancia profesional la realizó en el CENICA-JICA en el área de Residuos Sólidos. Su experiencia profesional a consistido como docente en nivel medio superior durante año y medio, posteriormente en el año de 2002, ingresó al IPN-UPIBI en la carrera de Ingeniería Ambiental, donde realizó su proyecto de investigación titulado: Adaptación de tres especies vegetales a un sistema de crecimiento en bolsas (growth pouch) para estudios microbiológicos de la rizósfera contaminada con queroseno, en el CINVESTAV-IPN en el área de Ecología Bioquímica, donde también realizó su servicio social. Al término de la carrera trabajo en una empresa de Estudios Ambientales en 2006, después se incorpora como docente de nivel medio superior en 2007. En el año 2008 continuó con sus estudios de postgrado, en el programa de Maestría en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible en la Universidad Autónoma Chapingo, donde realizo con el Dr. Juan J. Almaraz del Colegio de Posgraduados Campus Montecillos su proyecto de investigación de tesis titulada: Almacenamiento de carbono en los sistemas forestales y agrícolas de la falda oeste del Cerro Tláloc.

ALMACENAMIENTO DE CARBONO EN LOS SISTEMAS FORESTALES Y AGRÍCOLAS DE LA FALDA OESTE DEL CERRO TLÁLOC.

CARBON STORAGE IN THE FOREST AND AGRICULTURAL SYSTEMS ON THE WESTERN SLOPE OF MOUNT TLÁLOC.

Martínez-Rojas V; Almaraz-Suárez J. J.

RESUMEN

La concentración de dióxido de carbono (CO_2) en la atmósfera ha aumentado en el último siglo debido a la quema de combustibles fósiles y la deforestación; este aumento está causando cambios severos en el clima. Una forma de mitigar las emisiones de CO_2 es capturarlo y mantenerlo en la biomasa y el suelo. La vegetación juega un papel muy importante en la captura de carbono (C), ya que es a través de ella que se da el flujo de C entre la atmósfera y el suelo. En este estudio se cuantificó el C en la vegetación y el suelo de sistemas forestales, agrícolas y alpinos, a lo largo de un gradiente altitudinal, en la falda oeste del Cerro Tláloc, municipio de Texcoco; también se evaluó la relación entre el C y algunas propiedades del suelo. En la zona de estudio se establecieron 27 sitios de muestreo, y en cada uno de ellos se tomaron muestras de suelo, hierbas y mantillo. Se midió el diámetro normal y altura total de los árboles y con el uso de ecuaciones alométricas se determinó biomasa y C almacenado. En suelo se determinó densidad aparente, pH, C, N total y P asimilable. En hierba y mantillo se determinó C y N. El reservorio donde se presentó el mayor valor de C almacenado en la mayoría de los sistemas fue en el suelo, excepto en el bosque de encino y oyamel que fue en el estrato arbóreo. Los suelos fueron ácidos en todos los sistemas y la acidez aumentó con la altitud. El bosque de oyamel presentó mayor C almacenado en biomasa viva (211.2 Mg ha^{-1}) debido a que el bosque es denso, los árboles en su mayoría son adultos y son más altos comparado con los otros sistemas forestales estudiados y presenta gran cantidad de briofitas. También el contenido de N (153.2 kg ha^{-1}) y de P asimilable (25.3 kg ha^{-1}) en hierba fue mayor en éste sistema. En pradera alpina se obtuvo mayor contenido de C en suelo (308.4 Mg ha^{-1}). No se encontró relación entre la cantidad de N y el C del suelo ni tampoco entre el P y el C. Se observó una relación positiva y significativa entre el pH y el C del suelo; de igual forma entre la altitud y el C.

Palabras clave: Almacenamiento de carbono, sistemas forestales, agricultura, pradera alpina, bosque templado.

ABSTRACT

The concentration of carbon dioxide (CO_2) in the atmosphere has increased over the last century due to fossil fuel burning and deforestation; this increase is causing severe climatic changes. One way to mitigate CO_2 emissions is to sequester it in biomass and soil. Vegetation plays an important role in carbon sequestration (C), since it is through it that C flows between the atmosphere and soil. In this study, C in vegetation and in the soil of forest, agricultural and alpine ecosystems was evaluated along an altitudinal gradient on the western slope of Mount Tláloc, municipality of Texcoco. In addition, the relationship between C and some soil properties was evaluated. In the study area, 27 sampling sites were established, and at each one soil, grass and litter samples were taken. Normal diameter and height of trees were measured in order to estimate biomass and C storage by using allometric equations. Bulk density, pH, C, total N and available P in soils were evaluated as well as C and N in grass and litter. The highest value of C stored in most of the ecosystems was in soils, except in the oak and fir forest where the highest value of carbon stored was in the tree stratum. The soils were acid in all ecosystems and the acidity increased with altitude. The fir forest showed higher C stored in living biomass (211.2 Mg ha^{-1}) because the forest is dense and the trees are mostly adults and higher compared to those in other forest ecosystems. Additionally, the fir forest has a large amount of bryophytes. Also, the N content (153.2 kg ha^{-1}) and available P (25.3 kg ha^{-1}) in grass were higher in this ecosystem. The alpine area had greater soil C content (308.4 Mg ha^{-1}) than the other forest and agricultural ecosystems. No relationship was found between the amount of N and soil C, or between the P and C. There was a significant positive relationship between pH and soil C, and likewise between altitude and C.

Key words: carbon storage, forest ecosystems systems, agricultural, alpine vegetation, temperate forest.

ÍNDICE

RESUMEN	vi
ABSTRACT	vi
ÍNDICE DE CUADROS.....	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS	4
2.1 Objetivo General	4
2.2 Objetivos Particulares	4
III. HIPÓTESIS.....	5
IV. REVISIÓN DE LITERATURA	6
4.1. Ciclo global del carbono	6
4.2. Flujos y almacenes de carbono	6
4.3. Factores que afectan la mineralización y acumulación de carbono en el suelo.....	8
4.4. Emisiones de gases de invernadero y cambio climático	10
4.5. Los bosques y el cambio climático	11
4.6. Captura de carbono por la vegetación	12
4.7. Forestación.....	15
4.8. El carbono como servicio ambiental.....	15
4.9. Servicios ambientales.....	17
V. ÁREA DE ESTUDIO	19
5.1. Clima	21
5.2. Suelos	21
5.3. Vegetación	22
5.4 Fisiografía.....	24

VI. MATERIALES Y MÉTODOS.....	26
6.1. Medición en campo	26
6.1.1. Establecimiento de los sitios de muestreo	26
6.2. Carbono del suelo (CS)	27
6.3. Carbono en biomasa viva (BV).....	29
6.3.1. Carbono en árboles	29
6.3.2. Carbono en hierbas	30
6.3.3. Carbono en raíces gruesas y finas	31
6.4. Carbono en biomasa muerta (BM)	32
6.4.1. Carbono en mantillo.....	32
6.4.2. Carbono en materia muerta caída y árboles muertos en pie	32
6.5. Determinación de características del suelo	33
6.5.1. Textura.....	33
6.5.2. Valor de pH (reacción del suelo).....	33
6.5.3. Determinación de nitrógeno y fósforo en suelo y hierba	33
VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	34
7.1. Almacenamiento de carbono.....	34
7.1.1. Carbono en el suelo.....	34
7.1.2. Carbono en biomasa viva	37
7.1.3. Carbono en biomasa muerta	42
7.1.4. Carbono total almacenado.....	43
7.2. Factores que afectan el almacenamiento de carbono	46
7.2.1. Tipo de suelo	46
7.2.2. Reacción del suelo.....	47
7.2.3. Nitrógeno total en el suelo	51
7.2.4. Fósforo disponible en el suelo	53
7.2.5. Nitrógeno total y fósforo en hierbas	55

VIII. CONCLUSIONES.....	57
IX. RECOMENDACIONES	58
X. BIBLIOGRAFÍA	60
XI. ANEXOS	65

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1.	Ecuaciones alométricas utilizadas para la determinación de biomasa en kg.....	29
Cuadro 2.	Factores para determinar el carbono en raíz.	31
Cuadro 3.	Carbono total en suelo (Mg ha^{-1}) de los 6 usos de suelo y cubierta vegetal.....	35
Cuadro 4.	Rango promedio de altura y DAP en las diferentes especies.	38
Cuadro 5.	Carbono total en biomasa viva (Mg ha^{-1}) de los 6 usos de suelo y cubierta vegetal.	39
Cuadro 6.	Carbono total en biomasa muerta (Mg ha^{-1}) de los 5 usos de suelo y cubierta vegetal.	42
Cuadro 7.	Carbono total contenido en, biomasa viva (BV), suelo y biomasa muerta (BM) en Mg ha^{-1} de los 6 usos de suelo y cubierta vegetal.....	43
Cuadro 8.	Tipo de suelo y textura de los 6 uso de suelo y cubierta vegetal.	46
Cuadro 9.	Nitrógeno total en suelo (kg ha^{-1}) de los 6 usos de suelo y cubierta vegetal.....	51
Cuadro 10.	Fósforo total en suelo (kg ha^{-1}) de los 6 usos de suelo y cubierta vegetal.....	53
Cuadro 11.	Nitrógeno y Fósforo (kg ha^{-1}) en la hierba de los 5 usos de suelo y cubierta vegetal.	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. El ciclo global del carbono. Fuente: Jaramillo, 2004.	7
Figura 2. Localización del área de estudio, ubicada en la parte oeste del Cerro Tláloc en el municipio de Texcoco, Estado de México.....	19
Figura 3. Localización de los sitios de muestreo del área de estudio en la falda oeste del Cerro Tláloc en el municipio de Texcoco, Estado de México.....	20
Figura 4. Tipo de vegetación en el área de estudio de la falda oeste del Cerro Tláloc en el municipio de Texcoco, Estado de México.....	23
Figura 5. Esquema de parcela circular de 500 m ² o 1000 m ² , donde a = subparcelas para conteo de árboles b = subparcelas para muestreo de hierba, mantillo y suelo.....	27
Figura 6. Barrena de doble cilindro para determinación de densidad aparente.....	28
Figura 7. Subparcelas de 1 m ² para muestreo de hierba, mantillo y suelo.	30
Figura 8. Densidad de árboles por hectárea.	38
Figura 9. Carbono total almacenado en las reservas de los 6 usos de suelo y cubierta vegetal. AT: Agricultura de temporal. RC: Reforestación de cedro. BQ: Bosque de encino. BA: Bosque de oyamel. BP: Bosque de pino. PA: Pradera alpina.....	45
Figura 10. Reacción del suelo en los 6 uso de suelo y cubierta vegetal de 0 – 30 cm de profundidad.	47
Figura 11. Relación del valor de pH con el porcentaje de carbono a una profundidad de 0 – 30 cm y 30 – 60 cm.	49

Figura 12. Relación: a) altitud con el porcentaje de carbono y b) altitud con la reacción del suelo a una profundidad de 0 – 30 cm.....	50
Figura 13. Relación del nitrógeno con el porcentaje de carbono a una profundidad de 0 - 30 cm.	52
Figura 14. Relación del fósforo con el porcentaje de carbono a una profundidad de 0 - 30 cm.	54

I. INTRODUCCIÓN

La concentración de dióxido de carbono (CO_2) en la atmósfera se ha incrementado aproximadamente de 280 partes por millón en 1800 a 380 partes por millón en el 2004 debido a las emisiones originadas por las actividades humanas (IPCC, 2007). Se pronostica que la concentración de CO_2 y de otros gases de efecto de invernadero de origen antropogénico como metano y óxido nitroso continuarán aumentando en las próximas décadas, lo que provocará incrementos de la temperatura global entre 1.9 y 4.6 °C y en consecuencia cambios severos en el clima (IPCC, 2007). El cambio del uso del suelo (principalmente la deforestación) es el segundo contribuidor más importante de las emisiones de CO_2 después de la las emisiones por la quema de combustibles fósiles (Brown and Neil-Adger, 1995; IPCC, 2007). En los últimos años la tasa de deforestación a nivel mundial, principalmente conversión de las áreas forestales a tierras de cultivo y pastoreo, ha sido de 13 millones de hectáreas por año (FAO, 2006); esto ha contribuido con 0.5 a 2.7 Gigatoneladas de carbono (Gt de C) por año a las emisiones globales de CO_2 (IPCC, 2007).

Los sistemas forestales y agroforestales juegan un papel importante en la mitigación del cambio climático global porque funcionan como sistemas de captura de carbono (Winjum *et al.*, 1992; Nair, 1993; Litynski *et al.*, 2006). Proyecciones estimadas para el periodo 1995-2050, indican que a través de la silvicultura y la agroforestería a nivel mundial se puede llegar a capturar 38 billones Megagramos de carbono (Mg de C), lo cual equivaldría entre 11 y 15% del total de la emisiones fósiles emitidas en el mismos período (Brown, 1996a). De igual forma se estima que los bosques tropicales pueden llegar a capturar 2.1 billones Mg de C por año (Oelbermann *et al.*, 2004). Por consiguiente, es necesario conservar los bosques, no sólo por ser almacenes y sistemas de captura de carbono, sino porque son centros de biodiversidad.

Un sistema boscoso importante en el centro del país es la Sierra Nevada; esta es una región montañosa de 1227 km² localizada entre los límites de los Estados de México, Puebla, Tlaxcala y Morelos; posee gran variedad de ecosistemas y abundante diversidad de especies por lo que esta incluida dentro de las regiones prioritarias terrestres de la Comisión Nacional de Biodiversidad (Arriaga, 2000). Por su extensión y cubierta vegetal, la Sierra Nevada es un importante almacén de carbono; a pesar de ello, no hay datos de cuanto carbono esta almacenado en los diferentes sistemas agrícolas y forestales, particularmente en la parte norte, donde se encuentra el Cerro Tláloc; sería muy valioso conocer como han variado los niveles de carbono en los suelos debido al cambio de uso de la tierra, cuanto se ha perdido y cuales propiedades del suelo son determinantes en la acumulación o en la pérdida de carbono.

Los ecosistemas de sistemas montañosos son muy sensibles a la deforestación y al cambio climático por lo que sus almacenes de carbono están en riesgo de perderse (IPCC, 2007). Esto es especialmente aplicable a la Sierra Nevada, ya que se localiza en una de las áreas más densamente pobladas del país; donde las tasas de crecimiento poblacional de algunos de sus municipios es de hasta 12% anual (Plan Estatal de Desarrollo del Estado de México, 2008).

El carbono del suelo es susceptible de perderse por deforestación o alteración de los bosques; en selvas tropicales caducifolias de México se ha estimado que el suelo puede perder hasta el 60% cuando éstas son convertidas a praderas (García-Oliva *et al.*, 2006). Lo cual sugiere que los suelos pueden ser un almacén de carbono o bien convertirse en una fuente de emisiones de CO₂, que puede estar ligado a cambio de uso de la tierra y a factores ambientales. En el caso de la Sierra Nevada, los tipos de vegetación y uso del suelo que se presentan están íntimamente ligados al gradiente altitudinal (Sánchez *et al.*, 2006); por lo que es muy probable que estos dos factores tengan un gran efecto en los patrones de acumulación de carbono en los suelos.

En el presente estudio se cuantificó el carbono en la vegetación y en el suelo de sistemas forestales, agrícolas y alpinos en la falda oeste del Cerro Tláloc, municipio de Texcoco, siguiendo el gradiente altitudinal y se evaluó la relación entre algunas propiedades del suelo (pH, N, P, y tipo de suelo) y el carbono almacenado esto con el fin de valorar a los ecosistemas del Cerro Tláloc como importantes almacenes de carbono y generar información valiosa que sea de utilidad para las comunidades cercanas y agencias gubernamentales interesadas en la protección de sus bosques y en los servicios ambientales que éstos prestan.

II. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Determinar cuánto carbono está almacenado en el suelo y en los diferentes tipos de vegetación en la falda oeste del Cerro Tláloc siguiendo un gradiente altitudinal y evaluar la relación entre algunas propiedades del suelo con el carbono almacenado.

2.2 Objetivos Particulares

1. Cuantificar los almacenes de carbono en la biomasa viva, biomasa muerta y el suelo de los sistemas forestales, agrícolas, y alpino.
2. Determinar el efecto de algunas propiedades del suelo (pH, nitrógeno, fósforo y tipo de suelo) y el gradiente altitudinal en el almacenamiento de carbono de los sistemas forestales, agrícolas, y alpino.
3. Comparar el almacenamiento de carbono entre los diferentes usos de suelo para reconocer que sistema es el mayor almacén de carbono en la falda oeste del Cerro Tláloc.

III. HIPÓTESIS

1. El suelo es el reservorio con mayor almacenamiento de carbono seguido de la biomasa viva y por ultimo la biomasa muerta.
2. El pH, nitrógeno, fósforo y el tipo de suelo afectan el almacenamiento de carbono de los sistemas forestales, agrícolas, y alpino.
3. El bosque de oyamel presenta la mayor capacidad de almacenamiento de carbono.

IV. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1. Ciclo global del carbono

El carbono (C) pertenece al grupo 14 (o IVA) de la tabla periódica, con número atómico 6 y masa atómica 12.011, es parte fundamental y soporte de los organismos vivos, porque forma parte de proteínas, ácidos nucleicos, carbohidratos, lípidos y otras moléculas esenciales para la vida. Como en todos los elementos, el C disponible no es infinito en el planeta y por tanto, el C circula entre la materia orgánica y el ambiente físico-químico de manera constante. El movimiento del C ocurre a diferentes escalas espacio-temporales, que van desde el nivel molecular, pasando por el organismo hasta el global. El C, en su unión molecular con el oxígeno, forma el CO₂, gas resultante de procesos tanto geoquímicos como biológicos, y cuya presencia en la atmósfera es fundamental en la regulación de la temperatura del planeta debido a sus propiedades como gas de invernadero (Jaramillo, 2004).

El dióxido de carbono ha sido un componente importante de nuestra atmósfera desde hace miles de millones de años, cuando la gran actividad volcánica del planeta lo lanzaba a la atmósfera. La importancia del CO₂ y el vapor de agua en la atmósfera para la regulación de la temperatura es tal que sin su presencia la temperatura promedio actual del planeta sería aproximadamente 33 °C más fría y, por lo tanto, éste estaría congelado (Schlesinger, 1997).

4.2. Flujos y almacenes de carbono

Las plantas superiores adquieren el CO₂ atmosférico por difusión a través de pequeñísimos poros de las hojas conocidos como estomas, y es transportado a los sitios donde se lleva a cabo la fotosíntesis. Cierta cantidad de este CO₂ regresa a la atmósfera, pero la cantidad que se fija y se convierte en carbohidratos durante la fotosíntesis se conoce como producción primaria bruta

(PPB); ésta se ha estimado globalmente en $120 \text{ Pg C año}^{-1}$ (1 Pg [Petagramo] = 10^{15} g) (Figura 1).

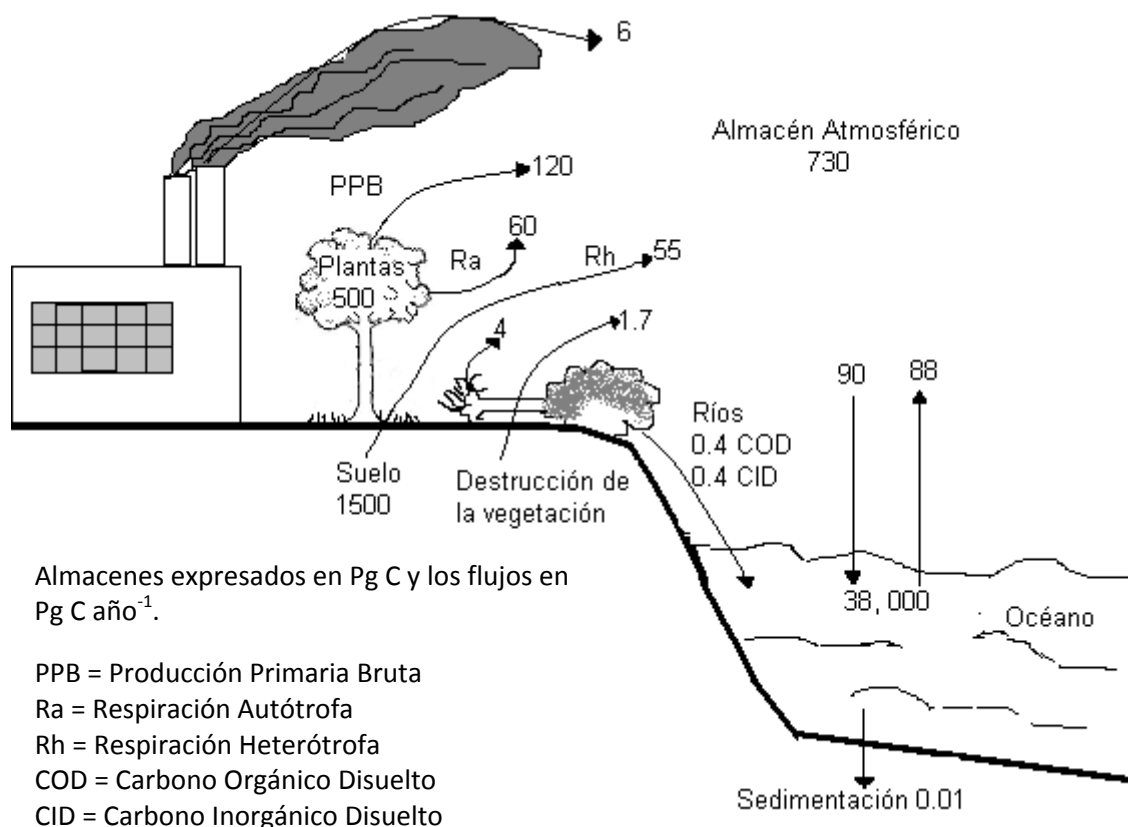


Figura 1. El ciclo global del carbono. Fuente: Jaramillo, 2004.

En los tejidos vegetales como hojas, raíces y tejido leñoso, se incorpora la mitad de la PPB (60 Pg C año^{-1}) y la otra mitad regresa a la atmósfera como CO_2 debido a la respiración autotrófica (respiración de los tejidos vegetales, Ra). El resultado de la diferencia entre el carbono fijado y el respirado en el crecimiento anual de las planta, se conoce como producción primaria neta (PPN) y en el nivel global se ha estimado en 60 Pg C año^{-1} . Casualmente, en el transcurso de pocos a muchos años, casi todo el carbono fijado por vía de la PPN regresa a la atmósfera por medio de dos procesos: la respiración heterótrofa (Rh), que incluye a los descomponedores de la materia orgánica y a los herbívoros; y por la combustión en los fuegos naturales o antropogénicos. Gran parte de la biomasa muerta se incorpora al detritus y a la materia orgánica

del suelo, donde es “respirada” a diferentes velocidades dependiendo de sus características químicas. Se producen así almacenes de carbono en el suelo, carbono que más tarde regresa a la atmósfera en diferentes periodos.

La diferencia entre la fijación de carbono por la PPN y las pérdidas por la Rh, en ausencia de otras perturbaciones que producen pérdidas de carbono (por ejemplo el fuego o la cosecha), se conoce como la producción neta del ecosistema (PNE). Y al contabilizar todas las pérdidas de carbono, tales como el fuego, la cosecha o remoción, el transporte por los ríos a los océanos y la erosión, lo que queda es el carbono que acumula efectivamente la biosfera a nivel global, y que se conoce como la producción neta del bioma (PNB). Ésta se ha calculado en $0.2 + 0.7 \text{ Pg C año}^{-1}$ para la década de los ochenta, y en $1.4 + 0.7 \text{ Pg C año}^{-1}$ para la de los noventa (Jaramillo, 2004).

4.3. Factores que afectan la mineralización y acumulación de carbono en el suelo

Los niveles de carbono en el suelo son regulados por el balance entre las entradas de carbono (residuos de la biomasa aérea y biomasa radical) y las pérdidas (emisiones de CO_2 de la materia orgánica en descomposición). El ambiente, la calidad del mantillo y la composición de las comunidades microbianas son los principales factores que controlan la descomposición; cambios en cada uno de estos factores pueden conducir a cambios en las tasas de mineralización y en la cantidad de carbono que puede almacenarse en el suelo (Hattenschwiler *et al.*, 2005).

Las tasas a las que los residuos vegetales se descomponen varían entre especies debido a diferencias en los contenidos de nitrógeno y lignina; los materiales vegetales ricos en lignina son resistentes a la degradación microbiana, mientras que los materiales con alto contenido de nitrógeno se descomponen más rápido que aquellos con bajo nitrógeno (Janzen and Kucey,

1988; Anderson, 1991; Cornelissen, 1996). La relación lignina/N es un indicador de recalcitrancia, dado que los residuos vegetales con una relación lignina/N alta son más resistentes a la descomposición que aquellos con una relación lignina/N baja (Cornelissen, 1996; Rasse *et al.*, 2005). A causa de estos factores las tasas de mineralización y el tiempo de residencia del carbono derivado de los residuos vegetales en el suelo es muy variable entre especies.

En los bosques templados, el mantillo de especies caducifolias se descompone más rápido que el de las especies siempre verdes, lo cual está relacionado con la cantidad de lignina y nitrógeno presentes en los tejidos (Elliot *et al.*, 1993; Cornelissen, 1996).

La productividad de un ecosistema (cantidad de biomasa derivada a partir de la fotosíntesis) define la cantidad potencial de carbono orgánico que se puede incorporar al suelo; de esto se desprende que aquellos factores que impactan la productividad primaria, también impactan la cantidad de materia orgánica que entra al suelo. Por ejemplo, las entradas de nitrógeno vía fijación biológica favorece la productividad de los bosques y la cantidad de residuos que entran al suelo, lo cual tiene un efecto positivo en la biomasa microbiana que es la encargada de descomponer la materia orgánica (Zak *et al.*, 1994).

El clima tiene gran influencia en el balance de carbono dado que afecta la productividad y la composición de los bosques y a los microorganismos que descomponen a la materia orgánica que entra al suelo (Kueppers y Harte, 2005). El carbono almacenado en los suelos puede perderse por deforestación y cambio de uso del suelo; Lal (2000) menciona que los suelos pueden ser una fuente de emisiones de dióxido de carbono o bien una demanda de carbono (almacén de carbono), lo cual depende del uso del suelo y las condiciones ambientales como temperatura, humedad y las propiedades del suelo, así como de los microorganismos del suelo y de la calidad de los residuos orgánicos.

La emisión de CO₂ en el suelo es el resultado de la respiración microbiana al descomponer sustratos orgánicos y de la respiración de las raíces de la vegetación; particularmente la actividad microbiana es afectada por la temperatura, el contenido de agua, los nutrientes, disponibilidad de oxígeno, el pH, carbono y nitrógeno del sustrato, y por factores biológicos (Paustian *et al.*, 1997; Högberg *et al.*, 2007; Almaraz *et al.*, 2009). Cambios en estos factores resulta en alteración de los flujos de CO₂ a la atmósfera y en el balance de carbono del suelo (Kueppers y Harte, 2005).

4.4. Emisiones de gases de invernadero y cambio climático

El cambio climático global es uno de los principales problemas que enfrenta actualmente el mundo. La temperatura se incrementó en 0.74 °C durante el último siglo, el nivel del mar ha aumentado a una tasa de 1.8 mm por año en el periodo 1901 - 2003, la cubierta promedio de hielo en el ártico disminuye a una tasa de 2.7 % por década y los cambios en los regímenes hídricos son notorios a diferentes latitudes (IPCC, 2007).

Las emisiones antropogénicas de CO₂ en la década de los 90's fueron en promedio de 8 Gt C año⁻¹, un 80 % de estas provinieron de la quema de combustibles fósiles y la producción de cemento, mientras el resto las originaron el cambio de uso del suelo, principalmente deforestación y combustión de la madera (IPCC, 2007).

Los gases de invernadero se producen naturalmente y son fundamentales para la vida en la Tierra; impiden que parte del calor solar regrese al espacio y sin ellos el mundo sería un lugar frío y sin vida. No obstante, cuando el volumen de estos gases en la atmósfera crece, provocan un incremento de las temperaturas y consecuentemente el clima se modifica (Dlugokencky, 2007); este es el denominado cambio climático global (CCG), el cual afecta a todas las regiones del planeta en mayor o menor medida, ya sea con inundaciones, sequías, cambios en rutas de migración y comportamiento de especies, o en la

productividad de los ecosistemas, derretimiento de los polos, el aumento del nivel de los océanos y cambios en el clima del planeta (González, 2007; IPCC, 2007).

4.5. Los bosques y el cambio climático

Los bosques se encuentran gravemente amenazados en numerosas partes del mundo. Durante la década de los noventa se perdieron en promedio casi 15 millones de hectáreas de bosque por año, sobre todo en las zonas tropicales (FAO, 2001); esta tasa disminuyó a 13 millones de hectáreas por año en el período 2000 - 2005, pero sigue siendo alta (FAO, 2006).

A la pérdida de la cubierta forestal, se suma la de los valiosos servicios que proporcionan los bosques, tales como la regulación de los flujos hidrológicos y la captura de carbono, además de la biodiversidad que albergan (Myers, 1997). También los bosques afectan a las condiciones climáticas locales y regionales, dado su papel para mantener temperaturas ambientales más bajas o la humedad relativa más elevada (Nobre *et al.*, 1991). De igual manera, los bosques pueden ser importantes para mantener o mejorar la productividad de las actividades agrícolas en las áreas circunvecinas (López, 1997).

Los bosques juegan un papel importante en la regulación del clima mundial. Las plantas verdes toman el CO₂ de la atmósfera en el proceso de la fotosíntesis y lo utilizan para elaborar azúcares y otros compuestos orgánicos necesarios para su crecimiento y metabolismo. Los árboles de larga vida almacenan el carbono en la madera y en otros tejidos, hasta su muerte cuando al descomponerse por acción de los microorganismos del suelo, liberan el carbono de su madera a la atmósfera en forma de dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), o metano (CH₄); también parte del carbono puede integrarse al suelo como materia orgánica (Bishop y Landell-Mills, 2006).

La captura de carbono por la cubierta forestal se basa principalmente en dos perspectivas: la absorción activa de la nueva vegetación y las emisiones evitadas gracias a la vegetación existente. La primera incluye a las actividades que implican la plantación de árboles nuevos (la reforestación o la agrosilvicultura) o el aumento en las tasas de crecimiento de la cubierta forestal existente (como mejores prácticas de silvicultura); ésta también incluye la sustitución de los combustibles fósiles por biomasa producida de manera sostenible que puede ser utilizada para producir biocombustibles o bioenergía. La segunda considera la prevención o reducción de la deforestación y del cambio de uso de suelo o la reducción del daño a los bosques existentes. Ésta puede incluir la conservación directa de los bosques o de métodos indirectos, como el aumentar la eficiencia productiva de los sistemas de agricultura de corte y quema o el mejorar la eficiencia en el uso final de los recursos (como el de la leña), ambos reducirían la presión sobre los bosques existentes (Bishop y Landell-Mills, 2006).

Los sistemas agroforestales podrían remover cantidades significativas de carbono de la atmósfera, dado que las especies arbóreas pueden retener carbono por un tiempo prolongado, principalmente en su madera (Hernán *et al.*, 2003). Los sistemas silvopastoriles podrían recibir pagos por ser mitigadores del calentamiento global y por otros servicios ambientales. El monitoreo del secuestro de carbono es una herramienta fundamental en los proyectos de mitigación. El diseño del inventario debe considerar el equilibrio costo-beneficio, con el fin de lograr un balance entre la precisión y los recursos disponibles (MacDiken, 1997).

4.6. Captura de carbono por la vegetación

La captura de carbono por medio de la forestación es una opción económica que puede contribuir a reducir el calentamiento global y conservar los recursos forestales. La vegetación juega un papel muy importante en la captura de carbono, ya que es a través de ella que se da el flujo de carbono entre la

atmósfera y el suelo. Entre los principales atributos de la vegetación que afectan este flujo está la productividad y la composición química del material vegetal. La productividad es la cantidad de biomasa derivada a partir de la fotosíntesis, la cual define la cantidad potencial de carbono orgánico que se puede incorporar al suelo. La composición química del material vegetal afecta la velocidad de la descomposición. Estos dos son diferentes en cada una de las especies vegetales, por lo que la composición específica de la vegetación tiene una influencia directa en la capacidad de captura de carbono del suelo (COFOM, 1999).

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

Una forma de mitigar los efectos que genera el CO₂ además de reducir las emisiones es capturarlo y mantenerlo el mayor tiempo posible en la biomasa y el suelo, para este efecto el manejo de la biomasa viva, la materia orgánica muerta y la materia orgánica del suelo son componentes clave en la dinámica y conformación de reservorios estables de carbono (De Jong *et al.*, 2004).

El almacenamiento de carbono se ha estimado en sistemas de café natural, monocultivo bajo sombra y policultivo tradicional, los cuales acumulan en promedio 172 Mg ha⁻¹ y se puede valorar económicamente el pago por captura de carbono; por lo que estos sistemas son importantes para almacenar grandes cantidades de carbono (Aguirre, 2006).

El secuestro de carbono se ha cuantificado en diferentes sistemas agroforestales tropicales utilizando testigos ecológicos, en donde se observó que los bosques primarios capturan $465.84 \text{ Mg ha}^{-1}$, huertos caseros $195.73 \text{ Mg ha}^{-1}$, café bajo sombra $195.69 \text{ Mg ha}^{-1}$, bosques secundarios $180.99 \text{ Mg ha}^{-1}$, sistema silvopastura $119.75 \text{ Mg ha}^{-1}$ y pastura 97.26 Mg ha^{-1} . De aquí la importancia de conservar los bosques primarios ya sean tropicales o templados para contribuir a la reducción de los gases de efecto invernadero (GEI) ya que ellos secuestran más carbono que los secundarios o los sistemas agroforestales (Callo, 2001).

En un estudio realizado por Jaramillo *et al.* (2003) en la región de Los Tuxtlas, Veracruz, México determinó la pérdida de biomasa y carbono del bosque primario, secundario y de pastizales a diferentes edades. Los resultados del estudio indicaron que la conversión de bosque primario a pastizal disminuyó el carbono almacenado en la raíz en casi 80% y representó 94% de la pérdida de carbono en la biomasa de los ecosistemas. Este tipo de trabajos son esenciales para comprender las consecuencias del cambio de uso del suelo y cubierta vegetal en la dinámica del carbono de las regiones tropicales y templadas.

Ordóñez *et al.* (2001) en su estudio en un bosque de *Pinus pseudostrobus* de clima templado en Nuevo San Juan, Michoacán estimó el carbono almacenado, mediante un modelo dinámico CO₂Fix, y obtuvo 217 Mg ha^{-1} de carbono total en el largo plazo (250 años); biomasa (aérea y subterránea) con 74 Mg ha^{-1} de carbono, 49 Mg ha^{-1} de carbono en productos forestales y 94 Mg ha^{-1} de carbono en el suelo.

Pacheco *et al.* (2007) evaluó el potencial para almacenar carbono en la biomasa aérea de una plantación de *Pinus greggii* en clima templado frío con seis años de edad establecida en Cuaunepantla, Acaxochitlán, en el Estado de Hidalgo, en la que obtuvo 17.9 Mg ha^{-1} de carbono, que representa una masa de dióxido de carbono equivalente de $65.8 \text{ Mg CO}_2 \text{ ha}^{-1}$.

4.7. Forestación

Por forestación se entiende el aumento de la cantidad de carbono almacenado en la vegetación (sobre tierra y bajo tierra), materia orgánica muerta y, a medio y a largo plazo, en productos de la madera. Las medidas para la forestación y la agrosilvicultura comprenden: i) programas de inversión estatales orientados a esas prácticas en tierras de propiedad pública; ii) programas forestales comunitarios que pueden ser apoyados por servicios de extensión del gobierno; y iii) plantaciones privadas con incentivos económicos y de otro tipo proporcionados por el gobierno. Estas medidas pueden orientarse a bosques de producción, agrosilvicultura y bosques de conservación. Los bosques de conservación comprenden los gestionados para combatir la erosión del suelo y la gestión de cuencas hidrológicas. Los consagrados fundamentalmente al secuestro de carbono han de ubicarse en tierras con reducidos costos de oportunidad, pues de otro modo es probable que se utilicen con fines distintos (Watson, 1996).

4.8. El carbono como servicio ambiental

Los mercados de captura de carbono son los más cercanos a una venta directa de un servicio ambiental, en la forma de certificados de reducción de emisiones o créditos de carbono. La captura de carbono se realiza a través de la captación y almacenaje del carbono atmosférico en la vegetación, mediante actividades como la reforestación, agrosilvicultura o la administración forestal de bajo impacto. Debido a que el carbono en la atmósfera es un mal global, no importa donde se generan los servicios de captura de carbono, porque se tendrán los mismos beneficios. Una tonelada de carbono captado en algún lugar y mediante un método dado, tiene el mismo impacto mitigante en el calentamiento global que una tonelada de carbono captada en cualquier otro lugar y bajo un método distinto. De hecho, esta equivalencia es lo que permite el uso de los bosques para satisfacer la demanda de reducción de emisiones. Por lo tanto, hay una

gran cantidad de compradores potenciales por todo el mundo. Los principales clientes son las empresas de los países del Anexo1 (países desarrollados) los cuales están comprometidos a reducir sus emisiones de carbono bajo los términos del Protocolo de Kyoto (Stefano *et al.*, 2006).

El Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), en teoría, ayuda a los países desarrollados a cumplir con sus compromisos cuantitativos para reducir emisiones a partir de la compra de Bonos de Carbono (BC) a un país en vías de desarrollo, el cual se beneficia al tener un ingreso adicional y acceso a créditos internacionales (González, 2007).

El Programa de Reducción de Emisiones de Carbono causadas por la Deforestación y la Degradación de los Bosques (REDD, por las siglas en inglés de Reduced Emissions from Deforestation and Forest Degradation) de la ONU apoyará a los países dentro del marco de un movimiento internacional para incluir proyectos REDD en programas nuevos y más amplios de la ONU en materia de cambio climático post 2012. Dado que la mayor parte de la deforestación y degradación de los bosques sucede en los países en desarrollo, la creación de un esquema REDD como un sistema internacional de compensación dirigido a los dueños de las áreas forestales en esos países constituye una iniciativa importante para promover un manejo forestal sustentable a escala global que logre conservar la cubierta forestal para reducir emisiones de CO₂ (CCMSS, 2009).

De esta manera, mientras que algunas propuestas en México buscan que el mecanismo REDD se base en la estructura de operación del actual esquema de PSA (Pago por Servicios Ambientales) de la CONAFOR (Comisión Nacional Forestal), enfocado principalmente en mantener polígonos arbolados (mantener los *stocks* de carbono en la masa forestal), otras propuestas promueven la definición de un REDD Plus bajo una visión integral que incluya la disminución de emisiones, la conservación de los *stocks*, la conservación de la

biodiversidad, la disminución del deterioro así como el fortalecimiento del capital social, a través de una serie de acciones dirigidas al manejo sustentable de los bosques (CCMSS, 2009).

4.9. Servicios ambientales

Los servicios ambientales según la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable (Artículo 7 fracción XXXVII) son “los que brindan los ecosistemas forestales de manera natural o por medio del manejo sustentable de los recursos forestales, tales como: la provisión del agua en calidad y cantidad; la captura de carbono, la generación de oxígeno; el amortiguamiento del impacto de los fenómenos naturales; la modulación o regulación climática; protección de la biodiversidad, de los ecosistemas y formas de vida; la protección y recuperación de suelos; el paisaje y la recreación, entre otros”. La importancia de estimar la dinámica de secuestro de carbono, radica en la posibilidad de generar información útil en la definición de estrategias ante el cambio climático. A la vez con tales estimaciones también se generarán elementos cuantitativos más sólidos para poder incluir la captura de carbono dentro del mercado de los servicios ambientales (Lazcano, 2006).

El concepto de captura de carbono normalmente integra la idea de conservar los inventarios de este elemento que se encuentran en suelos, bosques y otro tipo de vegetación y donde es inminente su desaparición así como el aumento de los sumideros de carbono a través del establecimiento de plantaciones, sistemas agroforestales y la rehabilitación de bosques degradados, sólo por mencionar algunos ejemplos en los que la vegetación es usada como sumidero (Bishop y Landell-Mills, 2006)

La asociación civil Pro natura y el Gobierno Federal han establecido para combatir el cambio climático, un programa de Mercado Voluntario de Carbono, en el que gobiernos, empresas privadas, organizaciones no gubernamentales y la sociedad en general, podrán asumir su responsabilidad por las emisiones de

Gases de Efecto Invernadero que generan y compensando mediante la adquisición de certificados del carbono que capturan los árboles en su etapa de crecimiento. Por ejemplo se tiene que un total de 10 comunidades oaxaqueñas reciben pago por captura de carbono, entre ellas están Santiago Xiacuí, Capulalpam de Méndez, La Trinidad, y San Juan Metaltepec. El recurso económico obtenido por la venta de estos certificados de dióxido de carbono, cuya tonelada tiene un costo de 10 dólares (Ordóñez *et al.*, 2001; Martínez, 2008), se entregara a los dueños de los bosques, es decir los comuneros, ejidatarios y pequeños propietarios, quienes tienen a su cargo la conservación y manejo sustentable de los bosques y selvas de nuestro país. Este dinero también contribuirá a elevar su calidad de vida, al tiempo que adquirirán un mayor compromiso por el cuidado de los recursos forestales (Martínez, 2008).

V. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio está ubicada en la parte oeste del Cerro Tláloc, casi en un 70% dentro del ejido de San Pablo Ixayoc, en el municipio de Texcoco, Estado de México (Figura 2). El municipio de Texcoco está ubicado al este del Estado de México y colinda al norte con Tepetlaoxtoc, Papalotla y Chiconcuac; al sur con Chimalhuacán, Chicoloapan e Ixtapaluca; al oeste con Atenco y al este con los Estados de Tlaxcala y Puebla. Sus coordenadas geográficas se encuentran entre los paralelos 19° 23' 40" y 19° 33' 41" Norte y los meridianos 98° 52' 58" y 99° 01' 45" Oeste a una altitud promedio de 2278 msnm (INEGI, 2001).

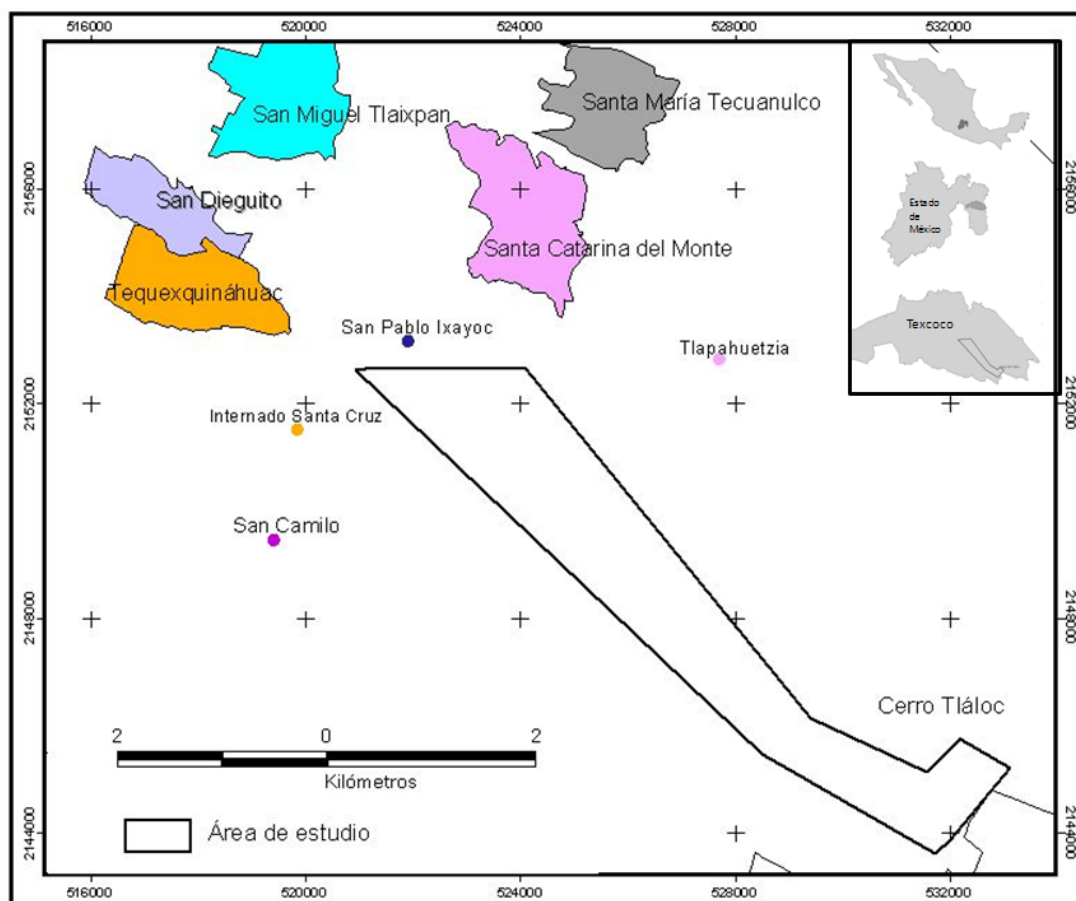


Figura 2. Localización del área de estudio, ubicada en la parte oeste del Cerro Tláloc en el municipio de Texcoco, Estado de México.

El área de estudio fue seleccionada considerando el Ejido de San Pablo Ixayoc que es una franja que abarca diferentes usos de suelo y cubierta vegetal. También se utilizó fotografías aéreas a escala 1:250 000 obtenidas de INEGI (1997) y se realizó un recorrido en un trayecto que va desde la comunidad de San Pablo hasta la cima del Cerro Tlalóc, con el fin de abarcar los diferentes tipos de vegetación y usos del suelo representativos de la Sierra Nevada. Su posición fue georeferenciada utilizando un GPS digital (marca Garmin, modelo 60cx). El área se encuentra entre los meridianos 98° 50' 05" y 98° 42' 09" Oeste y los paralelos 19° 29' 45" y 19° 23' 48" Norte, y abarca una altitud desde 2626 hasta 4127 msnm (Anexo 1).

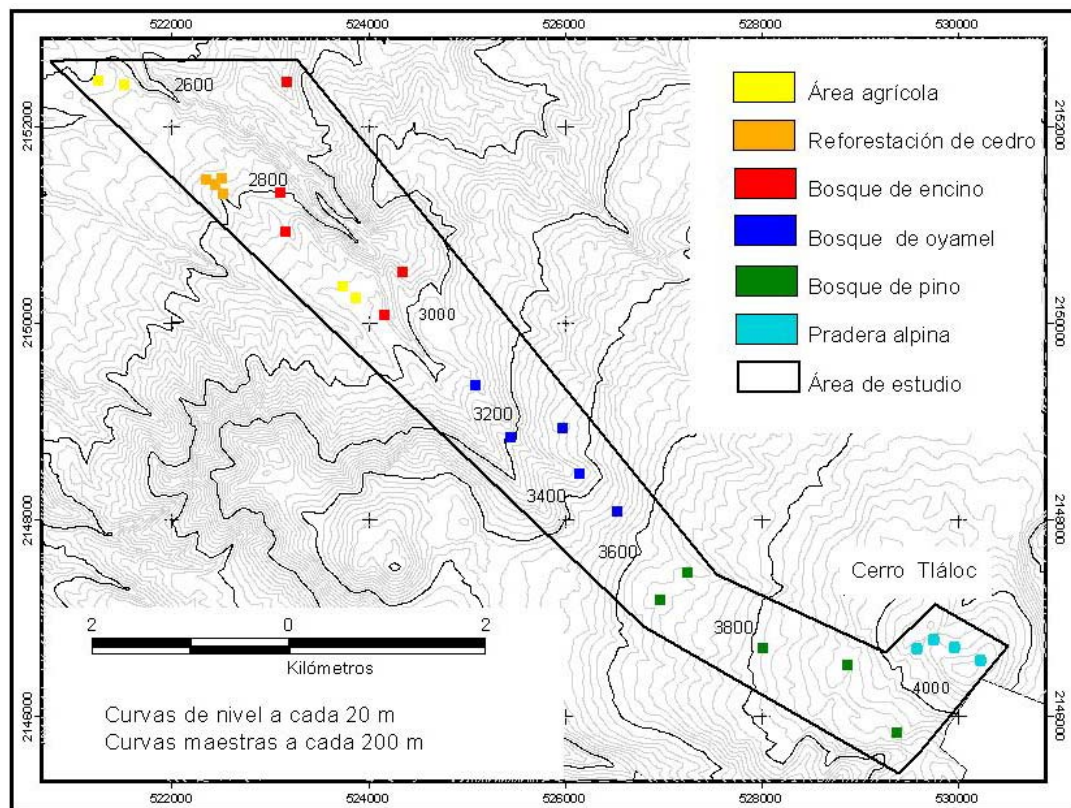


Figura 3. Localización de los sitios de muestreo del área de estudio en la falda oeste del Cerro Tlalóc en el municipio de Texcoco, Estado de México.

En la Figura 3 se presenta la distribución de los puntos de muestreo de los usos de suelo y cubierta vegetal en el área de estudio: agrícola (2626 – 2986 msnm),

reforestación de cedro (2771 – 2991 msnm), bosque de encino (2726 - 2991 msnm), bosque de oyamel (3093 – 3489 msnm), bosque de pino (3675 – 3935 msnm) y pradera alpina de alta montaña (4063 – 4127 msnm). Para la elaboración de mapas se utilizó el programa Arc View GIS 3.2 (ESRI, 1999), en el cual se determinó que el área de estudio tiene una extensión de 1080.021 ha.

5.1. Clima

El clima del área de estudio es semifrío y se caracteriza por tener una temperatura media anual entre 5° y 12° C; la temperatura media del mes más frío varía de - 3° a 18 °C y la del mes más cálido, entre 6.5° y 22 °C; éste es el más húmedo de los climas semifríos subhúmedos, con lluvias en verano, la precipitación del mes más seco es menor de 40 mm y el porcentaje de lluvia invernal menor de 5 mm. La precipitación total anual varía a lo largo del gradiente altitudinal en la zona de estudio, teniendo precipitaciones de 800 mm en la parte baja hasta 1200 mm en la parte más alta, donde se encuentra el bosque de pino y la pradera alpina. Las condiciones climáticas del área permiten realizar agricultura de temporal con restricciones moderadas, pues se presentan deficiencias de humedad, por lo que se puede obtener un solo ciclo agrícola al año pero suministrando riego de auxilio (INEGI, 2001).

5.2. Suelos

El área de estudio se encuentra dentro de la cordillera Sierra Nevada, en el Estado de México y el tipo de suelo que presenta es Feozem en la parte baja y Cambisol en la parte media y alta, estos dos son de textura media. Los suelos Feozems se caracterizan por presentar un horizonte A mólico, suave, rico en materia orgánica (más de 1 %) y saturación de bases mayor de 50 % por lo tanto el contenido de nutrientes (calcio, magnesio y potasio) es elevado. La formación de estos suelos es generada en gran medida por el intemperismo de las rocas de origen ígneo extrusivo que son abundantes en la zona y su drenaje interno varía de drenado a moderadamente drenado. Las limitantes físicas para

su uso y manejo son la presencia de una capa lítica (rocosa) o dúrica (tepetate) a menos de 50 cm de profundidad. Su susceptibilidad a la erosión es leve en las zonas planas y moderadas en laderas con pendientes más fuertes (INEGI, 2001).

La subunidad Feozem háplico, que es la que se presenta en el área de estudio, tiene un horizonte A mólico, con una reacción nula al fluoruro de sodio (NaF) y al ácido clorhídrico (HCl) diluido, y puede presentar un horizonte C o B cámbico. Este tipo de Feozems es el más fértil al uso agrícola. Los suelos cambisoles son jóvenes y poco desarrollados, presentan un horizonte A ócrico o úmbrico y un horizonte B cámbico o la presencia de un duripán o fragipán. En gran medida la formación de estos se debe al clima, pues son característicos de zonas de transición climática (INEGI, 2001).

En el área de estudio se encuentran las siguientes dos subunidades: Cambisol éutrico, el cual presenta un horizonte A ócrico y un horizonte B cámbico con un porcentaje de saturación de bases de 50 o más, por lo que su contenido de nutrientes puede ser abundante. De acuerdo con estas características su fertilidad al uso agrícola varía de moderada a alta. Cambisol húmico, que posee un horizonte A úmbrico, oscuro o negro, generalmente ácido y pobre en nutrientes pues su saturación de bases es menor de 50 %; el espesor es mayor de 25 cm si no existe el horizonte B cámbico (INEGI, 2001).

5.3. Vegetación

Entre las comunidades arbóreas que prosperan en los bosques templados de México destacan los bosques de encino, oyamel, pino y mixtos, en la Figura 4 se observa el tipo de vegetación en el área de estudio.

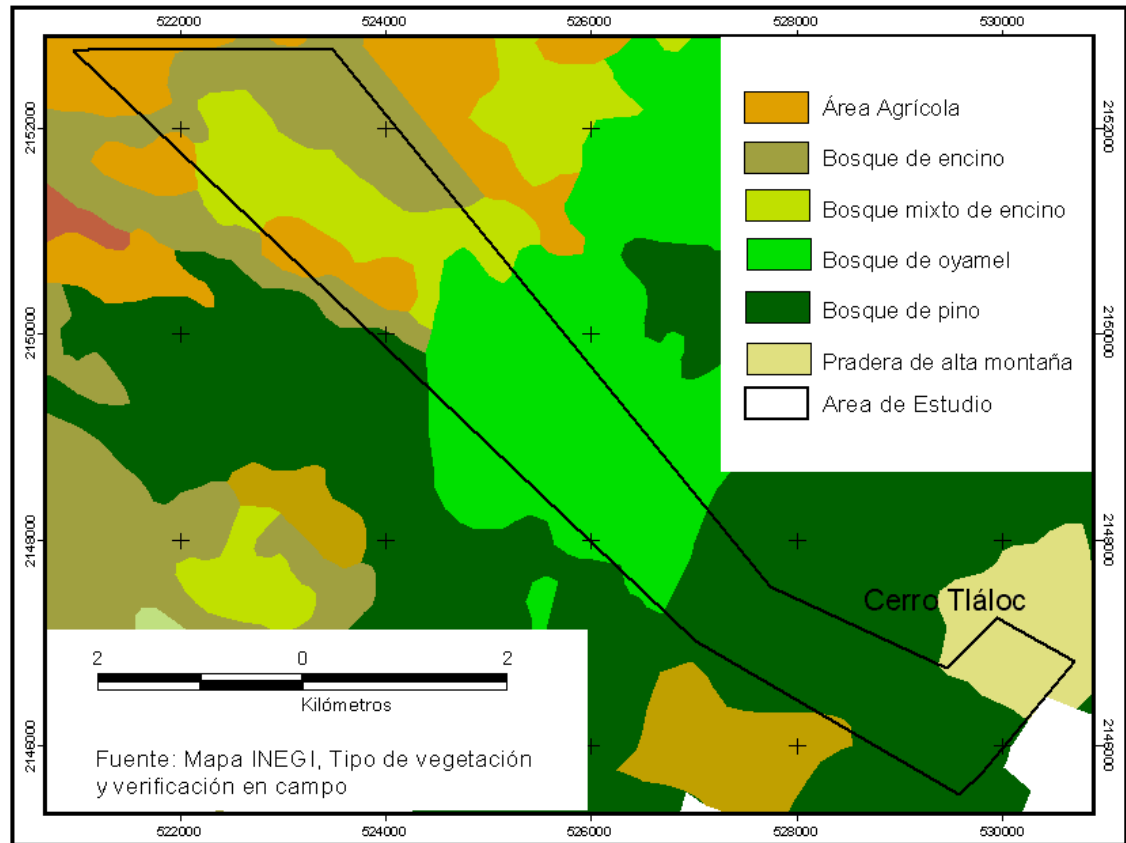


Figura 4. Tipo de vegetación en el área de estudio de la falda oeste del Cerro Tláloc en el municipio de Texcoco, Estado de México.

El bosque de encino esta dominado por diferentes especies del género *Quercus* (encinos o robles), estos bosques generalmente se encuentran como una transición entre los bosques de coníferas y las selvas, pueden alcanzar desde 4 hasta más de 30 m de altura, pueden ser abiertos o muy densos se desarrollan en muy diversas condiciones ecológicas. En el área de estudio, el bosque de encino y mixto de encino están constituidos por varias especies arbóreas y la especie dominante es *Quercus rugosa*, seguida de *Quercus laurina* y *Arbutus xalapensis* (Sánchez y López, 2003).

El bosque de oyamel está conformado por árboles altos, a veces mayores de 30m, con elementos de la misma especie o mixtos, acompañados por diferentes especies de coníferas y latifoliadas; algunos bosques son densos, sobre todo

en condiciones libres de disturbio. En el área de estudio, este bosque está dominado por elementos arbóreos del género *Abies religiosa* (INEGI, 2001).

El bosque de pino está constituido por poblaciones arbóreas que pueden tener un crecimiento relativamente rápido, muchos de ellos son resistentes a los incendios, a las sequías y soportan el pastoreo (INEGI, 2001); en general, los árboles más resistentes a incendios sequías son los que presentan mayor densidad, peso, contenido de humedad, compactación, tamaño y diámetro (Rodríguez *et al.*, 2002); los bosques de pino tienen una estructura muy homogénea pues generalmente las poblaciones se componen de unas cuantas especies (INEGI, 2001). El bosque de pino en el área de estudio está constituido por la especie arbórea *Pinus hartwegii*.

El pastizal alpino en el área de estudio se presenta aproximadamente entre los 4000 y 4127 m de altitud en la cima del Cerro Tláloc, en terrenos muy ondulados. Los árboles en esta área son muy escasos y de altura muy corta, la vegetación predominante es básicamente herbácea. De acuerdo con Sánchez y López, (2003) en el estrato arbóreo la única especie es *Pinus hartwegii*, mientras que en el estrato arbustivo domina *Baccharis conferta*, *Berberis schiedeana*, *Juniperus monticola* y *Senecio mairertianus*, y en el estrato herbáceo dominan las especies *Agrostis tolucensis*, *Alchemilla procumbens*, *Calamagrostis intermedia*, *C. schiedeana*, *Calandrinia acaulis*, *Conyza gnaphaloides*, *Gnaphalium liebmannii*, *Potentilla ranunculoides* y *Senecio roseus*.

5.4 Fisiografía

El Estado de México incluye en su territorio áreas pertenecientes a dos provincias fisiográficas: Eje Neovolcánico y Sierra Madre del sur. La primera región cubre el oriente, centro, norte y oeste; en tanto que la segunda, se restringe al sur y suroeste. La zona de estudio del presente trabajo se encuentra en el Eje Neovolcánico.

El Eje Neovolcánico abarca 75.65 % de la superficie del Estado de México; en este, algunas de las principales sierras son: Ajusco-Chichinautzin, que se extiende desde el oriente de Toluca de Lerdo hasta el pie de la Sierra Nevada y constituye el parte aguas meridional de la cuenca de la Ciudad de México; y de las Cruces y Monte Alto, sobre las cuales se encuentra el parteaguas que divide a las cuencas de la Ciudad de Toluca y de la Ciudad de México. Esta superficie pertenece a fragmentos de tres subprovincias: Lagos y Volcanes de Anáhuac, Mil Cumbres y Llanuras, y Sierras de Querétaro e Hidalgo.

La Sierra Nevada (Poyauhtécatl) donde se encuentra la zona de estudio esta dentro de la subprovincia Lagos y Volcanes de Anáhuac y se encuentra en la topoforma Sierra volcánica con estrato-volcanes o estrato-volcanes aislados; y esta orientada norte – sur, separa las cuencas de México y Puebla. Tiene casi 80 km de longitud y de 33 a 40 km de anchura; comenzó a formarse desde el Mioceno (hace unos 23 millones de años) cuando inicio la salida de material volcánico a causa de lo que debe haber sido una falla rectilínea orientada en el mismo sentido que la actual Sierra. Abarca parte de los Estados de México, Puebla, Tlaxcala y Morelos. Sus cumbres más importantes, de Norte a Sur son: Tláloc y Telapón, con 4120 y 4060 msnm respectivamente; el conjunto Volcánico Iztaccíhuatl, con 5220 m de altitud máxima y el Volcán Popocatepetl, con 5500 msnm (INEGI, 2001).

VI. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1. Medición en campo

En cada una de los sitios de muestreo de los diferentes usos de suelo y cubierta vegetal, se estimó la cantidad de carbono presente en los diferentes reservorios de acuerdo a la guía práctica para inventarios de gases de invernadero del IPCC (2003):

- a) *Biomasa viva*: árboles, hierbas, raíces (gruesas y finas) y cultivos en el caso de la zona agrícola
- b) *Biomasa muerta*: mantillo (hojarasca), materia muerta caída y árboles muertos en pie.
- c) *Materia orgánica del suelo*.

6.1.1. Establecimiento de los sitios de muestreo

Se establecieron 5 sitios de muestreo circular de 1000 m² en cada uno de los sistemas forestales (*Quercus spp*, *Abies religiosa* y *Pinus harwegii*) y 4 sitios en el área reforestada (*Cupressus lusitanica*); cada uno de estos sitios circulares se dividieron en 8 secciones o cuadrantes de 125 m² para medición de árboles; las secciones se marcaron tomando como referencia los 4 ejes cardinales de la parcela; y en cuatro de las secciones tomadas al azar se establecieron subparcelas de 1 m² para muestreo de hierba, mantillo y suelo ver Figura 5 (Delgadillo y Quechulpa, 2006).

En el área agrícola y pradera alpina de alta montaña se establecieron 4 sitios de muestreo circular de 500 m² (Ordóñez *et al.*, 2008). También éstos se dividieron en 8 secciones y en 4 de ellas se establecieron subparcelas de 1 m² para muestreo de hierba, mantillo y suelo. Las parcelas circulares de 1000 y 500 m² se ajustaron dependiendo de la pendiente (Anexo 3) del sitio de estudio

(Delgadillo y Quechulpa, 2006). En total se tuvieron 27 sitios de muestreo en toda el área de estudio.

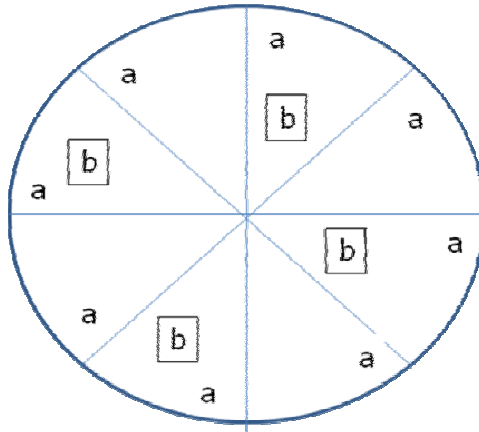


Figura 5. Esquema de parcela circular de 500 m² o 1000 m², donde a = subparcelas para conteo de árboles b = subparcelas para muestreo de hierba, mantillo y suelo.

6.2. Carbono del suelo (CS)

Para la toma de muestra de suelo se marcaron en las parcelas circulares de 500 y 1000 m² subparcelas de 1 m²; se tomaron 4 muestras de suelo a profundidades de 0 a 30 cm y 2 muestras de 30 a 60 cm, de igual forma se tomaron 4 muestras para determinación de densidad aparente, utilizando una barrena de doble cilindro de 5 cm de diámetro por 6 de largo (Figura 6). Las muestras fueron llevadas al laboratorio para determinar densidad aparente, pH, fósforo, nitrógeno y carbono. Cada una de las muestras se secó durante 7 a 10 días a temperatura ambiente, al término de este periodo las muestras fueron desagregadas mediante la utilización de un martillo de madera, para su posterior tamizado en malla número 40. El análisis de materia orgánica (MO) se realizó en el Laboratorio Central del Departamento de Suelos de la Universidad Autónoma Chapingo por el método de combustión húmeda (Jackson, 1976).



Figura 6. Barrena de doble cilindro para determinación de densidad aparente.

El contenido de carbono se obtuvo dividiendo el valor de la materia orgánica entre el factor de 1.724, esto con la finalidad de encontrar el porcentaje real de carbono presente en el suelo (Ruiz, 2002). Para estimar el carbono almacenado en suelo, es necesario medir la densidad aparente (DA) de éste en g L^{-1} (Forsythe, 1972); para lo cual, las muestras de suelo colectadas con el cilindro (volumen conocido) se secaron en un horno marca Thelco, modelo 130DM a $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 72 h para determinar peso seco. La densidad se calculó dividiendo el peso seco de la muestra entre el volumen.

Para obtener la cantidad de carbono orgánico por hectárea se aplicó la siguiente fórmula (Ruiz, 2002).

$$\text{CA} = \text{CS} * \text{DA} * \text{P} * 100$$

Donde:

CA= carbono almacenado (t ha^{-1})

CS= contenido de carbono en el suelo (%)

DA= densidad aparente (t m^{-3})

P= profundidad del suelo (m)

Se multiplica por 100 para convertir a toneladas ha^{-1} .

6.3. Carbono en biomasa viva (BV)

6.3.1. Carbono en árboles

Para la estimación de carbono presente en biomasa arbórea, se midió el diámetro a la altura del pecho (DAP) de los árboles, esto es a 1.3 m desde la base del suelo (Anexo 4); sólo se incluyeron los árboles de diámetro (D) $\geq$ a 5 cm dentro de cada una de las parcelas de 1000 m², paralelamente se midió la altura total de cada árbol utilizando un clisímetro marca Grome, modelo CL-19 (Delgadillo y Quechulpa, 2006).

La biomasa arbórea por individuo se calculó mediante modelos alométricos, que a continuación se muestran en el Cuadro 1:

Cuadro 1. Ecuaciones alométricas utilizadas para la determinación de biomasa en kg.

Especie	Ecuaciones	r ²	Referencia
Pino	$A = 0.084 \cdot D^{2.475}$	0.97	Ayala, 1998
Oyamel	$A = \text{Exp}(\beta_0 + \beta_1 \ln D)$	0.99	Jenkins, <i>et al.</i> 2003
Encino	$A = 1.91 \cdot D^{1.782}$	0.93	Ayala, 1998
Cedro	$A = \exp(-1.170 + 2.119 \cdot \ln(D))$	0.98	Brown, 1996b

Donde: A = Biomasa en kg, D = Diámetro a la altura del pecho (1.30 cm), $\beta_0 = -2.2304$ y $\beta_1 = 2.4435$.

Para el cálculo de la densidad de carbono total presente en la biomasa arbórea, se asumió por convención el valor de 0.5 como factor de carbono (IPCC, 2003). El carbono total por sistema se estimó sumando el carbono de todos los árboles por sistema forestal en cada uno de los sitios correspondientes.

6.3.2. Carbono en hierbas

En las parcelas de 1000 m² y 500 m² se marcaron aleatoriamente 4 subparcelas de 1 m² para la estimación de la biomasa herbácea (Figura 7). Se cortó el material herbáceo al ras del suelo y se pesó (peso fresco); se mezcló el material de las 4 subparcelas hasta formar una muestra compuesta y se tomó una submuestra de 100 g para secarse a 85 °C hasta peso constante. El peso seco total del material herbáceo colectado en cada una de las parcelas se calculó en base al porcentaje de humedad presente en las submuestras. Adicionalmente, el material herbáceo seco, se molió en un Molino Thomas Wiley Mill Modelo ED-5 de malla No 40. De la muestra molida se tomó una submuestra de 5 g para el análisis posterior de carbono, el cual se cuantificó por combustión en un equipo Carbon Analyzer Shimadzu Modelo TOC-5050A.

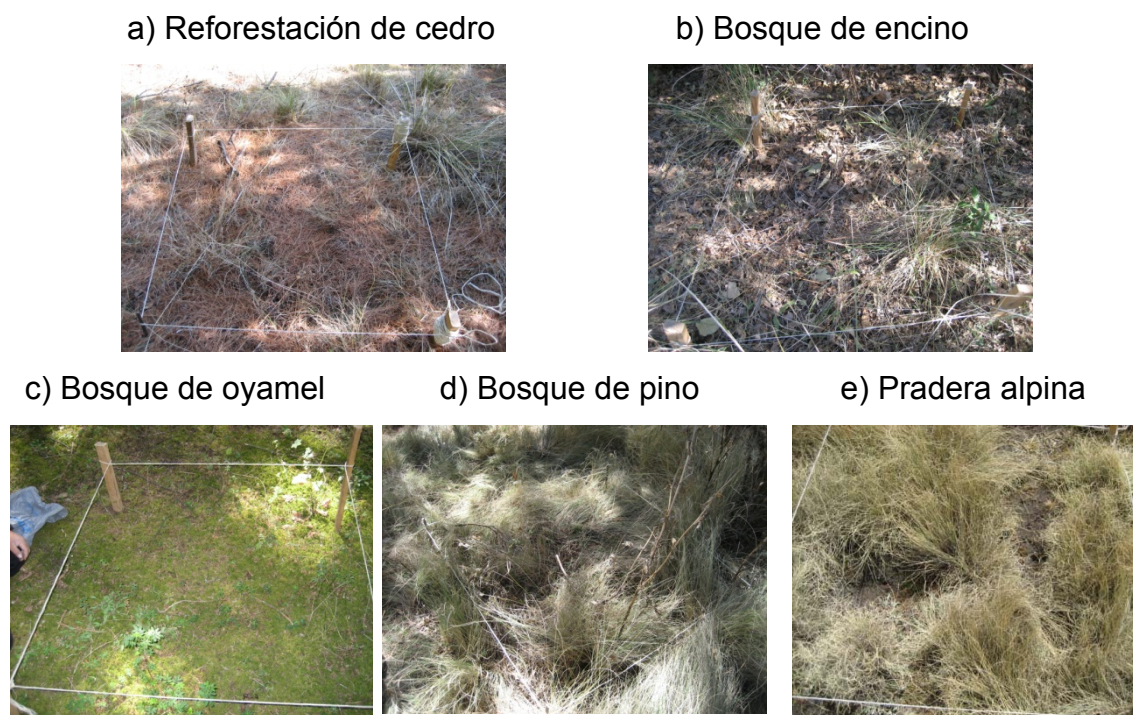


Figura 7. Subparcelas de 1 m² para muestreo de hierba, mantillo y suelo.

Para el caso de carbono en cultivo fue estimado con los valores de rendimiento de paja en t ha⁻¹, obtenidos por los agricultores en el ciclo agrícola 2008, al cual

se ajustó a base seca, tomando en cuenta que cuando un cultivo llega a madurez fisiológica este presenta una humedad de 5 a 10 porciento; el valor de peso seco estimado fue multiplicado por el factor de 0.5 para obtener el contenido de carbono fijado.

6.3.3. Carbono en raíces gruesas y finas

La cantidad de biomasa de raíces totales (gruesas y finas) presentes en cada sitio se estimó mediante factores que representan la relación raíz/parte aérea, en el Cuadro 2 se presentan los factores de raíz utilizados en el presente estudio.

Cuadro 2. Factores para determinar el carbono en raíz.

Especie	Factor de raíz	Referencia
Pino y Oyamel	0.26	Cairns <i>et al.</i> (1997)
Encino y Cedro	0.25	Cairns <i>et al.</i> (1997)
Cultivos	0.10	Ordóñez <i>et al.</i> (2008)

Para obtener el valor de carbono en la raíz de la pradera alpina se tomó una muestra de suelo con raíz, de 0.04 m² y 10 cm de profundidad. La raíz se separó del suelo, se pesó (peso fresco) y se puso en una estufa a secar a 85 °C hasta peso constante. Se determinó la biomasa y se multiplico por el factor 0.5 para determinar el contenido de carbono.

6.4. Carbono en biomasa muerta (BM)

6.4.1. Carbono en mantillo

En la parcela de 1000 m² y 500 m² se marcaron aleatoriamente 4 subparcelas de 1 m² para la estimación de la biomasa muerta (Figura 7), se recolectó el mantillo y se pesó (peso fresco); se mezcló el mantillo de las 4 subparcelas hasta formar una muestra compuesta, posteriormente se tomó una submuestra se pesó y registró el dato (peso fresco). La submuestra se llevó al laboratorio en bolsas de plástico bien identificadas para su procesamiento; en el laboratorio se pasó a una bolsa de papel para secarse a 85 °C hasta peso constante. Una vez seca la submuestra, se pesó y registró el dato (peso seco). Con el peso fresco y seco se calculó el porcentaje de humedad presente en la submuestra. Después el material herbáceo seco se molió y tamizó en un Molino Thomas Wiley Mill Modelo ED-5 de malla No 40. Finalmente se tomaron 5 g de cada submuestra para determinación de C, en un equipo Carbon Analyzer Shimadzu Modelo TOC-5050A.

6.4.2. Carbono en materia muerta caída y árboles muertos en pie

Las ramas caídas se pesaron en una balanza de reloj para obtener su masa en kilogramos. Para troncos caídos se midió diámetro y longitud; se determinó su masa multiplicando el área basal por la longitud y por la densidad de la madera (Delgadillo y Quechulpa, 2006). En el caso de árboles muertos en pie se midió diámetro y altura, aplicamos las fórmulas que se utilizaron para tallos leñosos, pero del resultado obtenido se consideró sólo un 70% de la biomasa viva. Esto se debe a que los árboles muertos pierden parte de su biomasa como las hojas, las ramas, la corteza y parte de las raíces dependiendo del grado de pudrición en que se encuentren (Schlegel *et al.*, 2001). Posteriormente los resultados obtenidos en kilogramos se convirtieron a toneladas y se multiplicó por el factor 0.5 para obtener toneladas de carbono por hectárea.

6.5. Determinación de características del suelo

6.5.1. Textura

La textura de los suelos, se determinó por el Método del Hidrómetro modificado por Day, en el Laboratorio de Física del Departamento de Suelos. La textura del suelo se determina en base a la composición porcentual de los separados, arenas, limo y arcilla (Tan, 1996).

6.5.2. Valor de pH (reacción del suelo)

Se usó un potenciómetro (modelo LS, marca Sargent-Welch Scientific) para cuantificar la reacción del suelo. Esto se realizó en el Laboratorio de Química del Departamento de Suelos. Para la determinación se pesaron 10 g de suelo en un recipiente con tapa de plástico y se adicionaron 20 mL de agua destilada (relación 1:2). Los botes se taparon y se metieron a un agitador marca Eberbach Corporation and Arbor, Michigan de 115 volts y 60 cy. ac., durante 20 minutos. Se calibró el potenciómetro con las soluciones amortiguadoras pH 4 y 7, después se leyeron las muestras, enjuagando el potenciómetro cuidadosamente después de leer cada muestra (Tan, 1996).

6.5.3. Determinación de nitrógeno y fósforo en suelo y hierba

En las muestras de suelo también se determinó: nitrógeno total por el método de extracción con cloruro de potasio (KCl 2N), determinado por arrastre de vapor; y fósforo asimilable por las plantas, utilizando el método Bray y Kurtz 1 (NOM-021-SEMARNAT-2000, 2002). A las muestras de hierba molida para determinación de carbono, también se les tomó una submuestra de 5g para determinación de nitrógeno total por el método de digestado con mezcla diácida y por arrastre de vapor (Bremner, 1965), y fósforo asimilable por el método de fotolorimetría por reducción con molibdo-vanadato. Estas determinaciones se llevaron a cabo en el Laboratorio Central del Departamento de Suelos de la Universidad Autónoma Chapingo.

VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1. Almacenamiento de carbono

Esta investigación constituye el primer análisis de almacenamiento de carbono en los diferentes tipos de vegetación y uso del suelo de la falda oeste del Cerro Tláloc en un gradiente altitudinal que incluye el límite de vegetación arbórea (arriba de 4000 msnm) y el efecto de algunas propiedades del suelo en el almacenamiento de carbono. El área de estudio se dividió considerando básicamente el tipo de vegetación dominante y el uso del suelo. El tamaño de las parcelas de 1000 m² fue semejante al utilizado por los inventarios forestales, solo que de forma circular; estas dimensiones son reportadas como adecuadas para reducir la sobreestimación o subestimación de la biomasa del arbolado (Acosta *et al.* 2002).

7.1.1. Carbono en el suelo

El almacenamiento de carbono en el suelo fue mayor en los primeros 30 cm de profundidad que a la profundidad de 30 a 60 cm (Cuadro 3), esto se puede explicar porque el contenido de materia orgánica en el subsuelo es generalmente bajo comparado con el de la superficie del suelo en donde se encuentran depositados los residuos orgánicos en descomposición tanto en suelos cultivados como vírgenes, acumulándose la materia orgánica en las capas u horizontes superiores (Porta *et al.* 2003). El suelo es el mayor depósito de carbono en los ecosistemas terrestres (Lal, 2004). La cantidad de carbono almacenado en el suelo depende del balance que se establece entre el aporte de carbono por los restos vegetales y las pérdidas de CO₂ producido por la actividad biológica (Reeder *et al.* 2001).

Las clases de uso de suelo y cubierta vegetal que presentaron mayor almacenamiento de carbono en el suelo a una profundidad de 0 a 30 cm y 30 a 60 cm, son el bosque de oyamel, bosque de pino y pradera alpina

respectivamente; los de menor almacenamiento de carbono en el suelo fueron el área agrícola, el área de reforestación de cedro y el bosque de encino (Cuadro 3).

Cuadro 3. Carbono total en suelo (Mg ha^{-1}) de los 6 usos de suelo y cubierta vegetal.

Clases	Profundidad (cm)		Carbono total
	0 - 30	30 - 60	
Agricultura [†]			
Promedio	31.7 ± 9.1	-	31.7 ± 9.1
Rango	16.5 – 54.3	-	16.5 – 54.3
Reforestación de cedro [†]			
Promedio	49.3 ± 2.8	31.9 ± 3	81.2 ± 4.3
Rango	42 – 54.7	27 – 40.4	68.9 – 88.7
Bosque de encino [¶]			
Promedio	86.6 ± 8.2	28.2 ± 3.0	114.7 ± 7.6
Rango	72.8 – 117.1	21.8 – 39.2	97.5 – 139
Bosque de oyamel [¶]			
Promedio	137.9 ± 10.5	60.4 ± 11.1	198.3 ± 21.5
Rango	116.6 – 166.2	38.1 – 93	159.4 – 259.3
Bosque de pino [¶]			
Promedio	158.6 ± 15	104.5 ± 20.3	263.0 ± 32.8
Rango	116.5 – 193.9	55.2 – 156.9	181.1 – 350.8
Pradera alpina [†]			
Promedio	166 ± 21.1	142.5 ± 22.2	308.4 ± 41.7
Rango	120.8 – 212.9	78.5 – 181	199.3 – 393.9

[†]: 4 sitios de muestreo.

[¶]: 5 sitios de muestreo.

Promedio: Promedio del contenido de carbono en los sitios de muestreo.

±: Error estándar.

En el suelo el carbono almacenado es altamente reactivo y dinámico (Dumanski, 2004). El cultivar tierras vírgenes o la conversión de ecosistemas naturales a la agricultura conduce a la pérdida de carbono del suelo con emisiones importantes de GEI a la atmósfera; esta pérdida se acentúa por la deforestación, quema de biomasa, labranza, remoción de residuos de cosecha y biomasa del terreno (Lal, 2002). Esto se puede apreciar en nuestros resultados donde el área agrícola y el área reforestada son los sitios con menor almacenamiento de carbono. Sin embargo, la restauración de tierras degradadas y erosionadas, así como la intensificación de la agricultura en terrenos agrícolas puede favorecer el secuestro de carbono en los suelos (Lal, 1999).

Los valores de carbono encontrados en el reservorio suelo, del bosque de encino con una profundidad de 0 a 30 cm son similares a los obtenidos por Aguirre (2006) para café natural, quien realizó un estudio de caracterización ambiental en sistemas agroforestales de café en el Estado de Chiapas. En sus tres sistemas incluyó una profundidad del suelo de 0 a 30 cm y obtuvo los siguientes valores de carbono: café natural con 87.97 Mg ha^{-1} , monocultivo bajo sombra $117.35 \text{ Mg ha}^{-1}$ y policultivo tradicional con $152.12 \text{ Mg ha}^{-1}$.

En sistemas de pastura en monocultivos y silvopastoriles de la selva lacandona, Chiapas, incluyeron una profundidad del suelo de 0 a 60 cm, obteniendo 60.62 Mg ha^{-1} en monocultivos, 66.68 Mg ha^{-1} en cercos vivos y 76.89 Mg ha^{-1} en árboles en potrero (Aguilar, 2007); estos valores de carbono son cercanos a los obtenidos en el área reforestada del presente estudio para la misma profundidad. Aún cuando la comparación no es muy adecuada por tratarse de estudios realizados en diferentes climas, ésta nos sugiere que posiblemente los niveles de carbono acumulado en el suelo estén muy relacionados con los niveles de productividad de los ecosistemas y agroecosistemas; esto es, con la cantidad de biomasa anual que se produce.

Comparando este trabajo con el realizado por Ordoñez *et al.* (2008) en un bosque de clima templado, se encontró que el carbono del suelo a una profundidad de 0 a 30 cm del bosque de oyamel y bosque de pino del presente estudio (Cuadro 3) fueron mayores a los obtenidos por estos autores, quienes obtuvieron valores de 93 Mg ha⁻¹ en bosque de oyamel y 93 Mg ha⁻¹ en bosque de pino. Sin embargo, en el presente estudio el valor de carbono del área agrícola (31.7 Mg ha⁻¹), área reforestada de cedro (49.3 Mg ha⁻¹) y bosque de encino (86.6 Mg ha⁻¹) fueron menores a los reportados por Ordoñez *et al.* (2008) quienes obtuvieron 82 Mg ha⁻¹ en agricultura, 76 Mg ha⁻¹ en plantaciones y 116 Mg ha⁻¹ en bosque de encino a la misma profundidad de 0 a 30 cm.

7.1.2. Carbono en biomasa viva

Las reservas de carbono en biomasa viva incluyen el contenido de carbono en árboles, hierbas y raíces para cada clase de uso de suelo y cubierta vegetal (Anexo 2). De los datos obtenidos en campo se obtuvo que el bosque de oyamel presenta árboles que alcanzan hasta 36 m de altura y 85 cm de diámetro (Cuadro 4) y tiene una cubierta arbórea más densa que el bosque de pino (Figura 8); en cambio pino alcanza alturas de 28 m y diámetros de 60 cm, y es el segundo más alto.

Encino alcanza alturas y diámetros menores que oyamel y pino (Cuadro 4); sin embargo la densidad del bosque de encino es mayor que la de bosque de pino y oyamel (Figura 8). Aunque en el bosque de encino los árboles tienden a dividirse al pie de la corona y en realidad se cuantificó el número de tallos por hectárea. El área reforestada de cedro tiene árboles de 10 años de edad y estos no sobrepasan los 8 m de altura y los 15 cm de diámetro (Cuadro 4).

Cuadro 4. Rango promedio de altura y DAP en las diferentes especies.

Especie	Rango de altura de árboles (m)	Rango de DAP (cm)
Reforestación de cedro	2 - 8	2 - 15
Encino	3 - 23	4 - 51
Oyamel	3 - 36	3 - 85
Pino	3 - 28	4 - 60

DAP= Diámetro a la altura del pecho de (1.30 m).

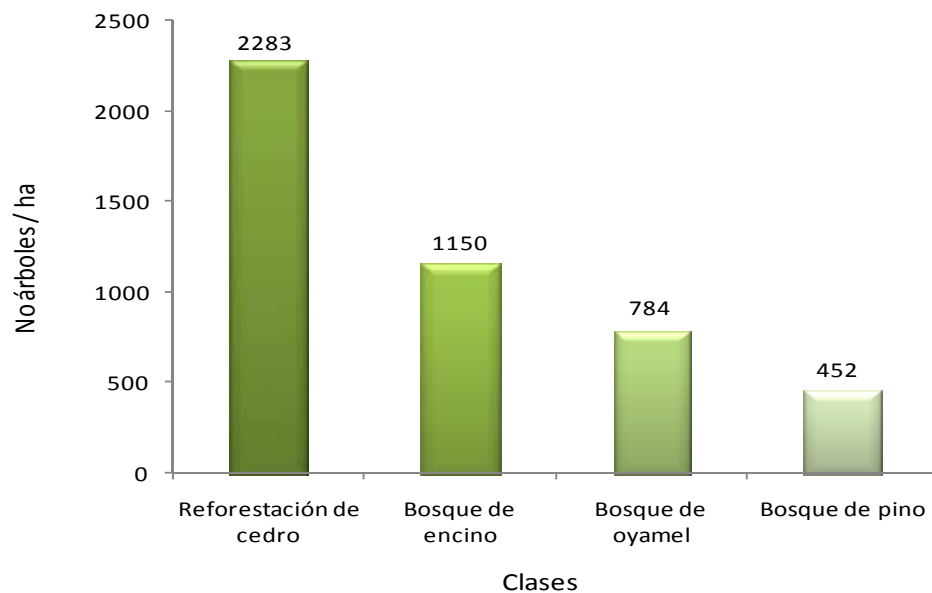


Figura 8. Densidad de árboles por hectárea.

En el Cuadro 5, se observa el rango de las reservas de carbono en biomasa viva. En donde el bosque de oyamel presenta un rango de almacenamiento de carbono en la biomasa de 145.2 – 278 Mg ha⁻¹ y un promedio de 211.2 Mg ha⁻¹; estos valores son altos comparados con los del bosque de pino, esto es debido a que el bosque es denso, los árboles en su mayoría son adultos y son más altos comparado con los otros sistemas forestales estudiados; también el bosque de oyamel presenta gran cantidad de briofitas, por lo que tuvo mayor almacenamiento de carbono en hierba que los otros sistemas forestales con 5 Mg ha⁻¹.

Cuadro 5. Carbono total en biomasa viva (Mg ha^{-1}) de los 6 usos de suelo y cubierta vegetal.

Clases	Hierbas	Árboles	Raíz	Carbono total
Agricultura [†]				
<i>Promedio</i>	1.0 [¶]	–	0.1	1.1
Reforestación de cedro [§]				
<i>Promedio</i>	0.5 ± 0.2	26.4 ± 5.5	6.6 ± 1.4	33.6 ± 6.9
<i>Rango</i>	0.2 – 1	12.8 – 37.5	3.2 – 9.4	16.6 – 47.8
Bosque de encino ^Φ				
<i>Promedio</i>	1.2 ± 0.3	151.7 ± 29.1	37.9 ± 7.3	190.8 ± 36.1
<i>Rango</i>	0.2 – 1.9	89.9 – 244	22.5 – 61	113.7 – 305.2
Bosque de oyamel ^Φ				
<i>Promedio</i>	5 ± 0.4	163.6 ± 18	42.5 ± 4.7	211.2 ± 23
<i>Rango</i>	4.3 – 6.2	111.8 – 215.7	29.1 – 56.1	145.2 – 278
Bosque de pino ^Φ				
<i>Promedio</i>	1.6 ± 0.3	46.6 ± 9	12.1 ± 2.3	60.3 ± 11.2
<i>Rango</i>	1.0 – 2.6	24.6 – 68.8	6.4 – 17.9	33.3 – 87.8
Pradera alpina [§]				
<i>Promedio</i>	2.2 ± 0.6	–	5.5 ^{††}	7.7 ± 0.6
<i>Rango</i>	1.0 – 3.9	–	–	6.5 – 9.4

†: Valor obtenido de la parcelas cosechadas por los agricultores del ejido.

¶: Biomasa de cultivos.

§: 4 sitios de muestreo.

Φ: 5 sitios de muestreo.

††: Valor obtenido de un bloque de suelo con raíz de 0.04 m^2 y 10 cm de profundidad

Promedio: Promedio del contenido de carbono en los sitios de muestreo.

±: Error estándar.

El bosque de encino es el segundo más alto en almacenamiento de carbono en la biomasa con un rango de $113.7 - 305.2 \text{ Mg ha}^{-1}$ y un promedio de 190.8 Mg ha^{-1} y con respecto al carbono almacenado en hierba fue bajo con 1.2 Mg ha^{-1} , comparado con el de bosque de pino y oyamel. La cantidad de carbono en el componente arbóreo fue mayor al encontrado en otro trabajo realizado por

Gómez (2008) en un bosque de encino con edad de 40 años (137.3 Mg ha^{-1}) en la Reserva de la biosfera “Sierra de Huautla”.

En el caso del bosque de pino que presenta menor densidad de árboles por hectárea (Figura 8), debido a la deforestación y a los incendios forestales frecuentes en el periodo de estiaje, se obtuvo un rango de almacenamiento de carbono de $33.3 - 87.8 \text{ Mg ha}^{-1}$ con un promedio de 60.3 Mg ha^{-1} , el cual es menor comparado con los bosques de encino y oyamel. En un estudio realizado por Pimienta de la Torre *et al.* (2007) en el ejido La Victoria, Pueblo Nuevo, Durango a *Pinus cooperi* encontró 51 Mg ha^{-1} de carbono almacenado tan solo en fuste limpio. También el carbono en hierba del bosque de pino de esta investigación fue bajo (1.6 Mg ha^{-1}).

El área reforestada de cedro presentó 33.6 Mg ha^{-1} de carbono y es el valor más bajo en biomasa con respecto a los bosques de encino, oyamel y pino de la zona de estudio; esto se debe a que son árboles pequeños con 10 años de edad. Este valor es menor al obtenido por Ordóñez *et al.* (2008) en plantaciones (63.5 Mg ha^{-1}). También el carbono en hierba del área reforestada del presente trabajo tuvo un valor bajo (0.5 Mg ha^{-1}), comparado con los bosques de encino, oyamel y pino. Pero este valor es mayor al que obtuvo Ordóñez *et al.* (2008) en plantaciones (0.04 Mg ha^{-1}).

En el área agrícola, se tiene un valor bajo de carbono (1.0 Mg ha^{-1}) en la parte aérea y en raíz (0.1 Mg ha^{-1}), debido a que se trata de cultivos anuales que tienen mucho menor biomasa que los árboles. Sin embargo, el valor total de carbono en biomasa viva del área agrícola del presente trabajo es mayor al de Ordóñez *et al.* (2008) que obtuvo 0.5 Mg ha^{-1} en agricultura.

En pradera alpina se tiene mayor valor de carbono en hierba (2.2 Mg ha^{-1}), que en reforestación de cedro, bosque de encino y pino, puesto que la vegetación dominante es herbácea. Sin embargo, en el reservorio de raíz el carbono

almacenado con 5.5 Mg ha^{-1} es casi igual al área reforestada (6.6 Mg ha^{-1}); pero en biomasa viva la pradera alpina es la segunda con menor almacenamiento de carbono comparado con los otros usos de suelo y cubierta vegetal (Cuadro 5).

El carbono encontrado en la biomasa viva del bosque de pino, encino y oyamel tienen similar variación a los resultados obtenidos por Ordóñez *et al.* (2008) que obtuvieron los siguientes valores: 169.7 Mg ha^{-1} en bosque de oyamel, 142.1 Mg ha^{-1} en bosque de encino y 93.1 Mg ha^{-1} en bosque de pino, en donde el oyamel fue el bosque con mayor almacenamiento de carbono y en plantaciones obtuvieron menor almacenamiento de carbono (63.7 Mg ha^{-1}), así como en el área agrícola (0.5 Mg ha^{-1}), por tanto, el presente estudio y el de Ordóñez *et al.* (2008) indican que la cantidad de carbono en vegetación disminuye al convertir los bosques a tierras de cultivo.

El carbono almacenado en la biomasa viva, del área de reforestación de cedro y bosque de pino de esta investigación, son similares a los obtenidos por Aguirre (2006) en su estudio de caracterización ambiental en sistemas agroforestales de café bajo sombra, realizado en el Estado de Chiapas. En sus tres sistemas obtuvo los siguientes valores de carbono: café natural con una densidad de 177 árboles por ha, tuvo 35.14 Mg ha^{-1} de carbono, en monocultivo bajo sombra con 360 árboles por ha tuvo 46.84 Mg ha^{-1} y en policultivo tradicional con 397 árboles por ha obtuvo 57.47 Mg ha^{-1} . Sin embargo, en el presente trabajo, el área reforestada tiene árboles de sólo 10 años de edad, los cuales al ir creciendo su biomasa aumentará y también aumentara el carbono almacenado en los siguientes años, en el sentido de que las plantaciones jóvenes presentan tasas altas de crecimiento y por ello tienen mayor potencial para la captura de carbono (Harmon *et al.*, 2000).

Aguilar (2007) en su trabajo en sistemas de pastura en monocultivos y silvopastoriles en la selva lacandona, Chiapas, obtuvo 1.99 Mg ha^{-1} de carbono

almacenado en monocultivos (maíz y frijol), este valor de carbono es mayor al obtenido en el área agrícola (1.0 Mg ha^{-1}) del presente estudio.

7.1.3. Carbono en biomasa muerta

El carbono almacenado en mantillo, fue mayor en el bosque de encino con 19.2 Mg ha^{-1} , que en los otros usos de suelo y cubierta vegetal (Cuadro 6) esto se explica porque se encontró 9 cm de espesor en promedio de mantillo. El valor de carbono en el mantillo encontrado en este trabajo, fue mayor al reportado por Gómez (2008) que obtuvo 8 Mg ha^{-1} en su estudio realizado en el bosque de encino de la Reserva de la Biosfera “Sierra de Huautla”, Morelos.

Cuadro 6. Carbono total en biomasa muerta (Mg ha^{-1}) de los 5 usos de suelo y cubierta vegetal.

Clases	Mantillo	Materia muerta caída y árboles muertos en pie	Carbono total
Reforestación de cedro [†]			
<i>Promedio</i>	9.1 ± 2.5	0.4 ± 0.1	9.5 ± 2.5
<i>Rango</i>	6.3 – 16.5	0.03 – 0.7	6.4 – 17
Bosque de encino [¶]			
<i>Promedio</i>	19.2 ± 4.3	0.3 ± 0.2	19.5 ± 4.4
<i>Rango</i>	9.0 – 29.2	0.1 – 1.1	9.1 – 30.3
Bosque de oyamel [¶]			
<i>Promedio</i>	18.3 ± 5.2	4.6 ± 1.9	22.9 ± 4.4
<i>Rango</i>	5.3 – 30.7	1.0 – 11.7	13.4 – 35.1
Bosque de pino [¶]			
<i>Promedio</i>	7.8 ± 0.8	0.7 ± 0.1	8.4 ± 0.7
<i>Rango</i>	4.5 – 9.1	0.3 – 1.1	5.5 – 9.4
Pradera alpina [†]			
<i>Promedio</i>	1.1 ± 0.5	-	1.1 ± 0.5
<i>Rango</i>	0.5 – 2.6	-	0.5 – 2.6

[†]: 4 sitios de muestreo.

[¶]: 5 sitios de muestreo.

Promedio: Promedio del contenido de carbono en los sitios de muestreo.

±: Error estándar.

El bosque de oyamel es el segundo en carbono almacenado por mantillo, pero es el mayor almacén de carbono en materia muerta caída y árboles muertos en pie (Cuadro 6), por lo que aporta mayor contenido de carbono total en biomasa muerta con 22.9 Mg ha⁻¹. Lo anterior se explica porque este bosque presentó mayor número de ramas caídas y árboles muertos en pie que los otros sistemas forestales.

7.1.4. Carbono total almacenado

El carbono total encontrado en los diferentes reservorios (suelo, biomasa viva y biomasa muerta) de los 6 usos de suelo y cubierta vegetal en la falda oeste del Cerro Tláloc, se muestran en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Carbono total contenido en, biomasa viva (BV), suelo y biomasa muerta (BM) en Mg ha⁻¹ de los 6 usos de suelo y cubierta vegetal.

Clases	BV	Suelo	BM	Carbono total
Agricultura				
<i>Promedio</i>	1.1 [†]	31.7 ± 9.1 [¶]	-	32.8 ± 9.1
<i>Rango</i>		16.5 – 54.3		1.1 – 54.3
Reforestación de cedro [¶]				
<i>Promedio</i>	33.6 ± 6.9	81.2 ± 4.3	9.5 ± 2.5	124.2 ± 4.6
<i>Rango</i>	16.6 – 47.8	68.9 – 88.7	6.4 – 17	116.8 – 137.3
Bosque de encino [§]				
<i>Promedio</i>	190.8 ± 36.1	114.7 ± 7.6	19.5 ± 4.4	325.1 ± 41.9
<i>Rango</i>	113.7 – 305.2	97.5 – 139	9.1 – 30.3	225.1 – 436
Bosque de oyamel [§]				
<i>Promedio</i>	211.2 ± 23.0	198.3 ± 21.5	22.9 ± 4.4	432.4 ± 38.8
<i>Rango</i>	145.2 – 278.0	159.4 – 259.3	13.4 – 35.1	330.4 – 523.8
Bosque de pino [§]				
<i>Promedio</i>	60.3 ± 11.2	263 ± 32.8	8.4 ± 0.7	331.8 ± 27.1
<i>Rango</i>	33.3 – 87.8	181.1 – 350.8	5.5 – 9.4	260.6 – 389.6
Pradera alpina [¶]				
<i>Promedio</i>	7.7 ± 0.6	308.4 ± 41.7	1.1 ± 0.5	317.2 ± 42.3
<i>Rango</i>	6.5 – 9.4	199.3 – 393.9	0.5 – 2.6	207.1 – 405.8

[†]: Valor obtenido de una sola parcela.

[¶]: 4 sitios de muestreo.

[§]: 5 sitios de muestreo.

Promedio: Promedio del contenido de carbono total en los sitios de muestreo.

±: Error estándar.

El bosque de oyamel es el mayor almacén de carbono con 432.4 Mg ha^{-1} , seguido de los otros tipos de vegetación que presentan valores similares de carbono entre ellos: bosque de encino (325.1 Mg ha^{-1}), bosque de pino (331.8 Mg ha^{-1}) y pradera alpina (317.2 Mg ha^{-1}). En el caso de este último su carbono total aumenta por el gran almacenamiento de carbono que presenta en el suelo (Cuadro 7).

En la Figura 9 se puede observar la distribución del carbono en los diferentes componentes de cada uno de los usos de suelo y cubierta vegetal; en donde se observa que el suelo presentó mayor almacenamiento de carbono, excepto en el bosque de encino y bosque de oyamel en los cuales el mayor almacenamiento de carbono se tiene en el estrato arbóreo. Después del suelo y el componente arbóreo, el reservorio donde se encuentra mayor carbono almacenado es en raíz, seguido de la biomasa muerta y por ultimo la hierba; excepto en pradera alpina que fue en hierba donde se encontró mayor carbono que en biomasa muerta.

Aguirre (2006), en su estudio de caracterización ambiental en sistemas agroforestales de café bajo sombra en el Estado de Chiapas, observó que el principal reservorio de carbono fue el suelo y su almacenamiento osciló entre 87.92 y $152.12 \text{ Mg ha}^{-1}$, seguido de la biomasa viva y por último en biomasa muerta. En otro estudio realizado en la selva lacandona, Chiapas, en sistemas agroforestales (monocultivos, cercos vivos y árboles en potrero) también se obtuvo el mayor almacén de carbono en el suelo con rango de 60.6 a 76.9 Mg ha^{-1} (Aguilar, 2007).

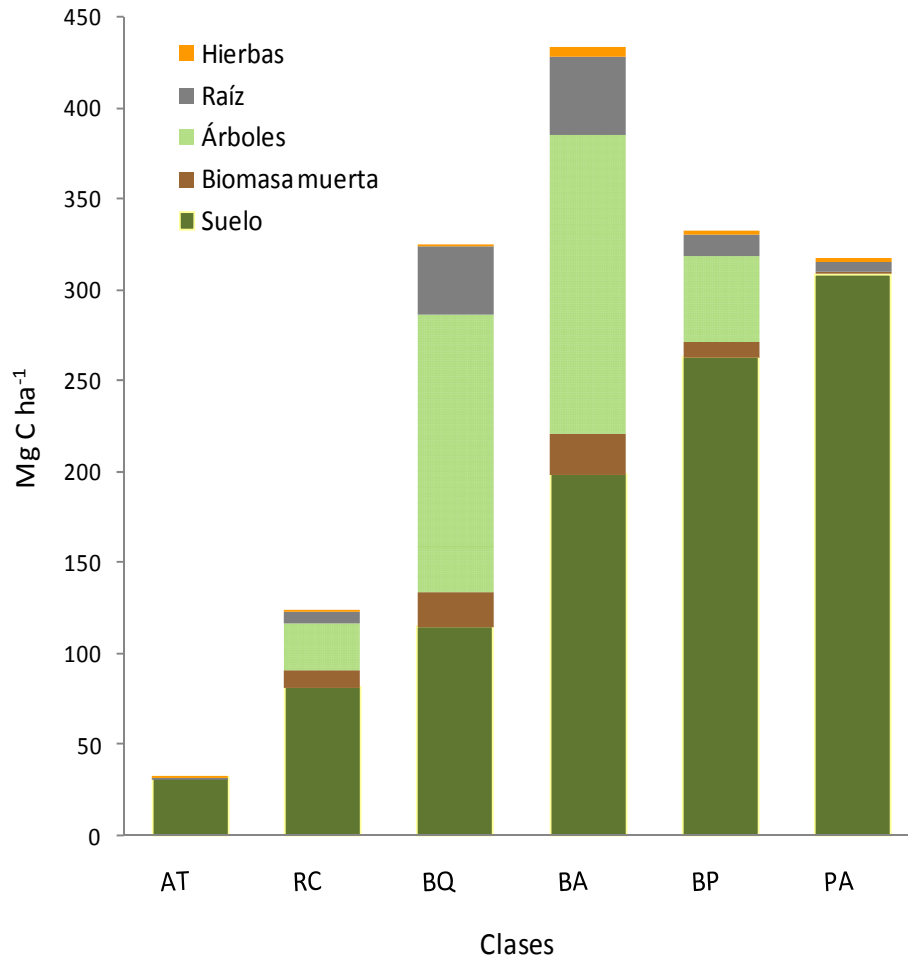


Figura 9. Carbono total almacenado en las reservas de los 6 usos de suelo y cubierta vegetal. AT: Agricultura de temporal. RC: Reforestación de cedro. BQ: Bosque de encino. BA: Bosque de oyamel. BP: Bosque de pino. PA: Pradera alpina.

Ordóñez *et al.* (2008) realizó un estudio en Michoacán con respecto al carbono almacenado en los reservorios suelo, biomasa viva y mantillo, en áreas con distintos usos de suelo y cubierta vegetal, donde obtuvo que el suelo es el mayor almacén de carbono en áreas agrícolas, pastizales, matorrales, plantaciones y huertos de aguacate, excepto en los sistemas forestales, los cuales presentaron el mayor almacén en biomasa viva. En su estudio sólo incluyó una profundidad del suelo de 0 a 30 cm para la determinación de carbono.

En general en nuestros resultados se puede observar que en agricultura y área reforestada tenemos menor almacenamiento de carbono que en los bosques (encino, oyamel y pino) y pradera alpina. Por lo que la conversión de bosques a pastos o tierras de cultivos se traduce en una disminución significativa de almacenamiento de carbono (Houghton, 1996), degradación de la calidad del suelo (Campos *et al.*, 2007) y a un aumento de las emisiones de CO₂ a la atmósfera (Kauffman y Uhl 1990).

7.2. Factores que afectan el almacenamiento de carbono

7.2.1. Tipo de suelo

La zona de estudio tuvo un gradiente altitudinal desde 2626 msnm hasta 4140 msnm, que va desde el área agrícola en las partes bajas hasta el área de pradera alpina en la parte más alta. En el Cuadro 8 se muestra el tipo de suelo y textura para cada clase de uso del suelo y cubierta vegetal.

Cuadro 8. Tipo de suelo y textura de los 6 uso de suelo y cubierta vegetal.

Clases	Tipo de suelo [†]	Clave [†]	Textura [¶]
Pradera alpina	Cambisol eútrico	Be	Franco Arenoso
Pino	Cambisol eútrico	Be	Franco y Franco Arenoso
Oyamel	Cambisol húmico	Bh	Franco y Franco Arenoso
Encino	Cambisol húmico	Bh	Franco
	Feozem háplico	Hh	Franco
Reforestación (Cedro)	Feozem háplico	Hh	Franco
Agricultura	Cambisol húmico	Bh	Franco y Franco Arcilloso
	Feozem háplico	Hh	Franco y Franco Arcilloso

[†]Fuente: Síntesis de INEGI 2001.

[¶]: Textura determinada en el Laboratorio de Física de Suelos por el Método del Hidrómetro modificado por Day.

En este cuadro se observa que dominan tres tipos de suelo: cambisol eútrico en las partes altas, cambisol húmico en la parte media y feozem háplico en la parte baja (INEGI, 2001); en el presente estudio se encontró que el porcentaje de arcilla disminuye al aumentar la altitud, mientras que el porcentaje de arena aumenta con la altitud. Las texturas que se encontraron en estos suelos fueron: franco, franco arenoso y franco arcilloso.

Los suelos francos son aquellos que tienen una textura media (45 % de arena, 40 % de limo y 15 % de arcilla), aunque este valor puede variar; los suelos franco arenosos contienen mayor porcentaje de arena y los franco arcillosos presentan mayor porcentaje de arcilla. Estos suelos presentan las mejores condiciones tanto físicas como químicas, siendo los más aptos para el cultivo (Porta *et al.*, 2003).

7.2.2. Reacción del suelo

En la Figura 10 se puede observar que los suelos en el área de estudio son ácidos porque se encuentran entre los rangos de 4.53 a 5.73 y los suelos son más ácidos conforme aumenta la altitud.

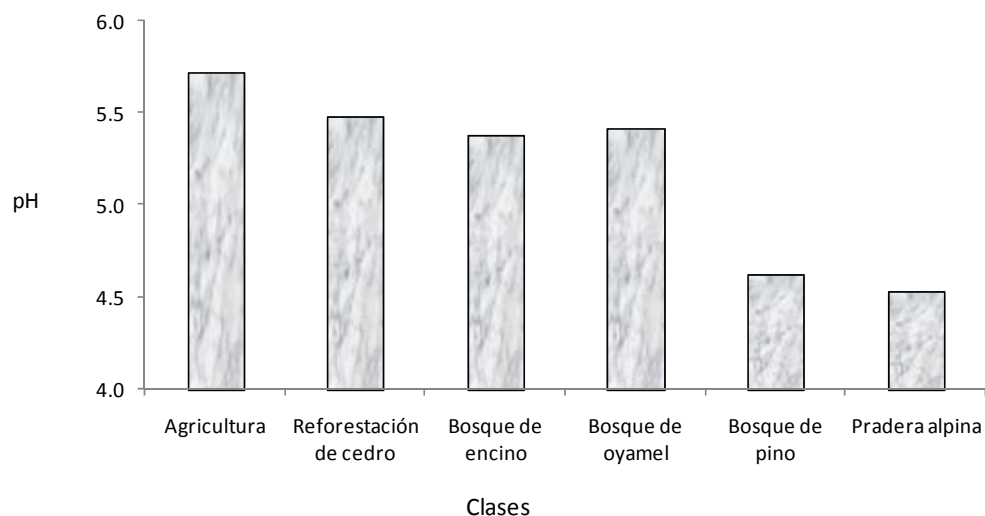


Figura 10. Reacción del suelo en los 6 uso de suelo y cubierta vegetal de 0 – 30 cm de profundidad.

La acidéz puede ser producida por los residuos de las plantas o residuos orgánicos que al descomponerse generan ácidos orgánicos. También porque la precipitación puede exceder la evapotranspiración, esto da por resultado el lavado del suelo; este lavado elimina gradualmente a las sales solubles, a los minerales del suelo más fácilmente solubilizables y a las bases. Consecuentemente las superficies del suelo lixiviadas se transforman en ácidas, ligeramente ácidas y moderadamente ácidas (Porta, *et al.* 2003). En este estudio, los valores de pH fueron desde muy ácido en pradera alpina y bosque de pino a moderadamente ácido en bosque de oyamel, encino, reforestación de cedro y áreas agrícolas.

En la Figura 11 se muestra la relación entre el porcentaje de carbono y la reacción del suelo, donde se encontró que el pH contribuye con un 48 % a la variabilidad del carbono que está almacenado en el perfil de 0 a 30 cm de profundidad en el área de estudio; mientras que esta variable contribuye con un 72 % a la variabilidad del carbono que se encuentra en el perfil de 30 a 60 cm de profundidad. Las dos figuras indican que a pH más ácido hay mayor acumulación de carbono; por ejemplo, cuando los valores de pH fueron de 4.2 a 4.7, el porcentaje de carbono en el suelo fue de los más altos. Lo cual sugiere que estos valores de pH limitan la actividad de los microorganismos encargados de descomponer el material vegetal que entra al suelo, lo que resulta en una mayor acumulación de carbono (Madigan, 2004).

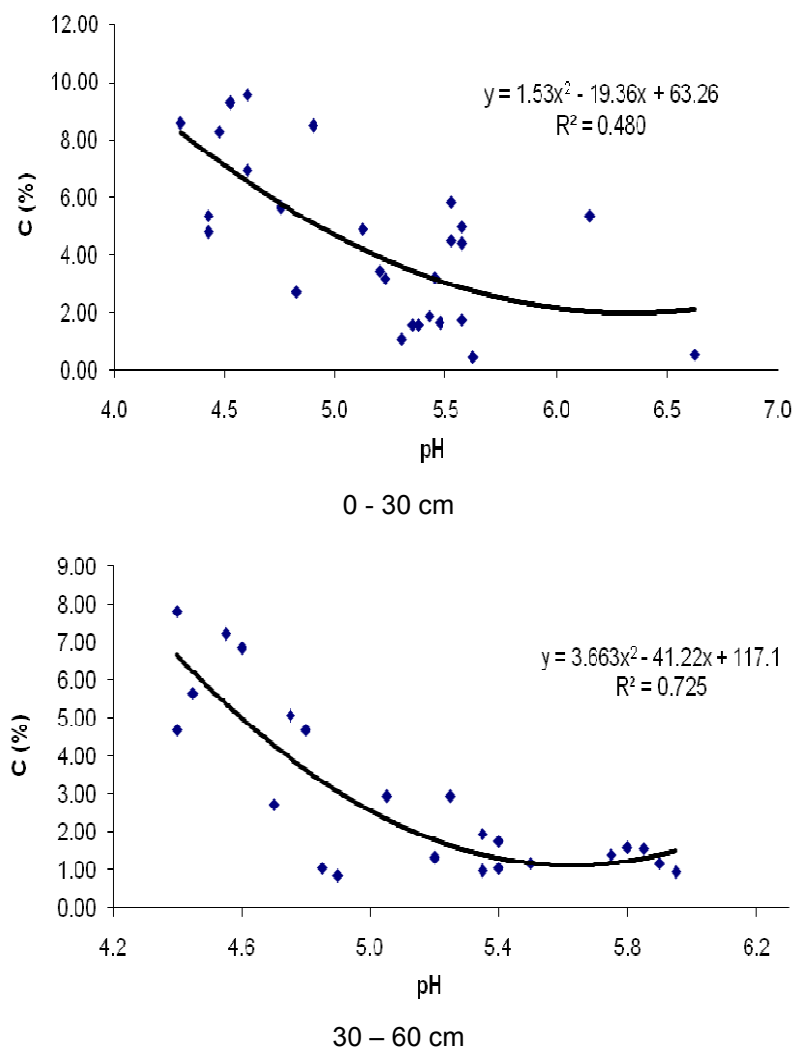
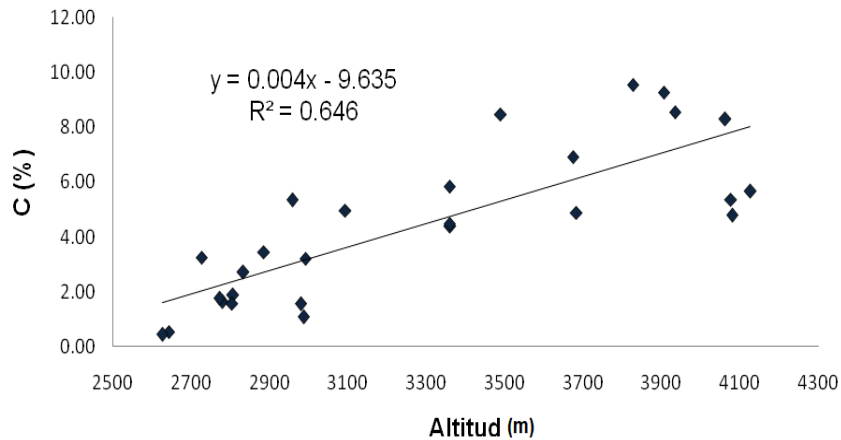


Figura 11. Relación del valor de pH con el porcentaje de carbono a una profundidad de 0 – 30 cm y 30 – 60 cm.

En cuanto a la relación entre altitud y la cantidad de carbono en el suelo a una profundidad de 0 a 30 cm, se observó que la altitud influye en un 65% en el contenido de carbono del suelo. Esto se debe en parte a que hay una relación estrecha entre altitud y pH, debido a que los suelos más ácidos se encontraron a mayor altitud (Figura 12). Adicionalmente, la temperatura disminuye con la altitud de tal forma que en pradera alpina la temperatura es más baja que en el área agrícola (Campos *et al.*, 2007). Estos contrastes de temperatura tienen un efecto en los microorganismos porque la actividad microbiana baja cuando la

temperatura es también baja lo cual contribuye a la acumulación de carbono en el suelo (Almaraz *et al.*, 2009).

a)



b)

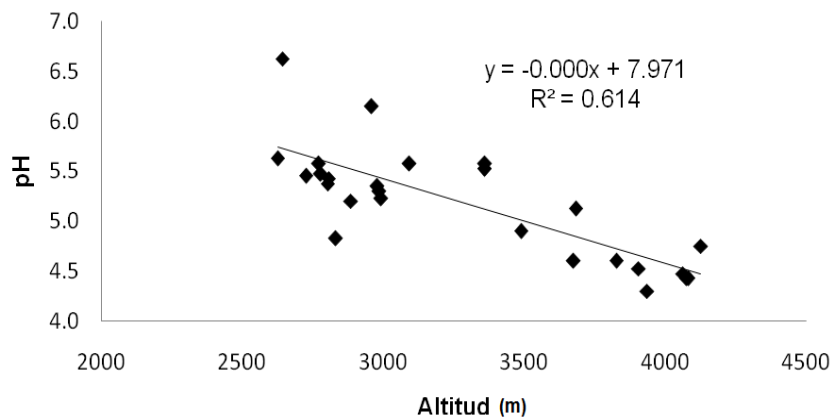


Figura 12. Relación: a) altitud con el porcentaje de carbono y b) altitud con la reacción del suelo a una profundidad de 0 – 30 cm.

Campos *et al.* (2007) en su estudio realizado en el Volcán Cofre de Perote Veracruz, obtuvo un incremento de materia orgánica en el suelo conforme aumentó el gradiente altitudinal, esta tendencia es similar a la encontrada en esta investigación; pero no es el caso para pH, porque en el estudio realizado en el Cofre de Perote los valores de pH fueron uniformes a lo largo del gradiente altitudinal.

7.2.3. Nitrógeno total en el suelo

Con respecto al nitrógeno total, se encontró que los suelos agrícolas tienen en promedio 93.3 kg ha^{-1} a una profundidad de 0 a 30 cm, el cual es mayor comparado con los suelos forestales, exceptuando al suelo alpino que tuvo similar valor al agrícola (Cuadro 9). En el caso del área agrícola los agricultores utilizan fertilizante comercial en sus tierras de cultivo por lo que presentan mayor contenido de nitrógeno, que los sistemas forestales.

Cuadro 9. Nitrógeno total en suelo (kg ha^{-1}) de los 6 usos de suelo y cubierta vegetal.

Clases	Profundidad (cm)		Nitrógeno Total
	0 - 30	30 - 60	
Agricultura [†]			
<i>Promedio</i>	93.3 ± 5.7	-	93.3 ± 5.7
<i>Rango</i>	80.5 – 106.3	-	80.5 – 106.3
Reforestación de cedro [†]			
<i>Promedio</i>	58.9 ± 8.2	48.5 ± 8.6	107.3 ± 16.2
<i>Rango</i>	45.6 – 81.7	29.9 – 71.4	78.5 – 153
Bosque de encino [¶]			
<i>Promedio</i>	61 ± 4.5	42.6 ± 5.6	103.6 ± 6.8
<i>Rango</i>	52 – 72.8	26 – 52.3	82.4 – 125.1
Bosque de oyamel [¶]			
<i>Promedio</i>	57.8 ± 6.9	46.5 ± 6.9	104.3 ± 11.2
<i>Rango</i>	36.3 – 78.1	36 – 73.9	75.1 – 138.6
Bosque de pino [¶]			
<i>Promedio</i>	43.8 ± 4.8	30.2 ± 2.2	74 ± 6.9
<i>Rango</i>	32 – 60.7	23.8 – 36.8	55.7 – 97.5
Pradera alpina [†]			
<i>Promedio</i>	88 ± 7.7	78.4 ± 1.8	166.4 ± 7.8
<i>Rango</i>	65.4 – 99.8	73.7 – 82.7	143.9 – 178.4

[†]: 4 sitios de muestreo.

[¶]: 5 sitios de muestreo.

Promedio: Promedio del contenido de nitrógeno total en los sitios de muestreo.

±: Error estándar.

Los suelos de la pradera alpina a la profundidad de 30 a 60 cm son los que presentaron mayor contenido de nitrógeno (78.4 kg ha^{-1}). Cuando se incluye todo el perfil del suelo de 0 a 60 cm, la pradera también es la que tuvo el valor más alto con 166.4 kg ha^{-1} ; en este sistema la cantidad de nitrógeno almacenado puede deberse a que los óxidos de nitrógeno generados por la industria y automoviles en el valle de México son arrastrados al lugar por el viento y luego al contacto con la lluvia forma ácido nítrico que es depositado en el suelo (Broughton, 1981). No se determinó cuáles son las formas de nitrógeno en el suelo; no obstante se conoce que suelos de un pH muy ácido pueden favorecer la acumulación de amonio, debido a que esta condición limita al proceso de nitrificación (Brady, 2000). El amonio es menos móvil que el nitrato y puede ser retenido en los suelos durante largos periodos de tiempo si las condiciones para la nitrificación son desfavorables (Tisdale y Nelson, 1982).

En la Figura 13 se muestra la relación entre nitrógeno y la cantidad de carbono en el suelo a una profundidad de 0 a 30 cm, en donde se observa que la cantidad de nitrógeno en el suelo no influye en el contenido de carbono, esto es, no hay relación entre las dos variables.

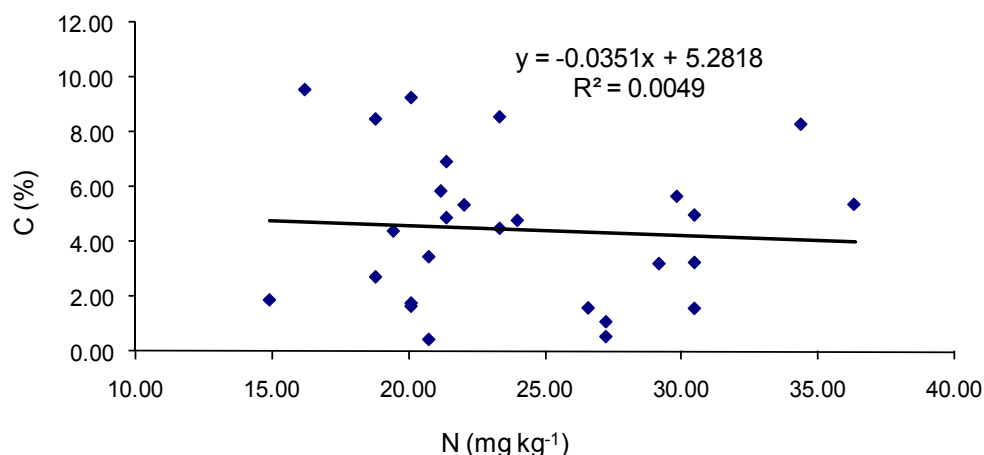


Figura 13. Relación del nitrógeno con el porcentaje de carbono a una profundidad de 0 - 30 cm.

7.2.4. Fósforo disponible en el suelo

El contenido de fósforo disponible se encontro en mayor cantidad en el suelo agrícola con 38 kg ha^{-1} en los primeros 30 cm de profundidad, que en los otros usos de suelo y tipos de vegetación (Cuadro 10).

Cuadro 10. Fósforo total en suelo (kg ha^{-1}) de los 6 usos de suelo y cubierta vegetal.

Clases	Profundidad (cm)		Fósforo total
	0 - 30	30 - 60	
Agricultura [†]			
<i>Promedio</i>	38 ± 4	-	38 ± 4
<i>Rango</i>	27.4 – 45.9	-	27.4 – 45.9
Reforestación de cedro [†]			
<i>Promedio</i>	31 ± 4.1	37.6 ± 10.3	68.6 ± 14.4
<i>Rango</i>	24.2 – 42.9	22.2 – 67.7	46.4 – 110.7
Bosque de encino [¶]			
<i>Promedio</i>	37.6 ± 8.5	42.7 ± 10	80.3 ± 17.8
<i>Rango</i>	23.6 – 70.9	23.6 – 76.0	47.2 – 146.9
Bosque de oyamel [¶]			
<i>Promedio</i>	35.4 ± 9.2	30.2 ± 5.9	65.6 ± 14.7
<i>Rango</i>	12.5 – 58.8	11.5 – 45.6	23.9 – 98.2
Bosque de pino [¶]			
<i>Promedio</i>	18.1 ± 3.1	13.3 ± 1.6	31.4 ± 4.2
<i>Rango</i>	9.4 – 26.1	9.2 – 18.1	18.7 – 39.4
Pradera alpina [†]			
<i>Promedio</i>	27.8 ± 2.3	23.5 ± 1.8	51.4 ± 3.2
<i>Rango</i>	22.5 – 33.4	20.5– 28.4	43.3 – 57.9

[†]: 4 sitios de muestreo.

[¶]: 5 sitios de muestreo.

Promedio: Promedio del contenido de fósforo disponible en los sitios de muestreo.

±: Error estándar.

En el caso del perfil de 30 a 60 cm sólo se muestreo en los suelos forestales y pradera alpina, donde bosque de encino presentó mayor contenido de fósforo con 42.7 kg ha⁻¹ y cuando se incluye todo el perfil de 0 a 60 cm, el bosque de encino también tuvo mayor contenido de fósforo con 80.3 kg ha⁻¹. En el bosque de pino y la pradera alpina que tienen suelos muy ácidos, se obtuvieron valores bajos de fósforo disponible con 31.4 kg ha⁻¹ y 51.4 kg ha⁻¹, respectivamente (Cuadro 10); esto puede deberse a que el fósforo a pH bajo forma compuestos con el Fe³⁺ y el Al³⁺ difícilmente solubles (Buchholz y Wollenhaupt, 1990).

En la Figura 14 se tiene la relación entre el fósforo y el contenido de carbono en el suelo a una profundidad de 0 a 30 cm donde se observa que el fósforo no influye en la cantidad de carbono almacenado, ya que al aumentar la cantidad de fósforo, el carbono no aumenta, si no que este varía independientemente del fósforo.

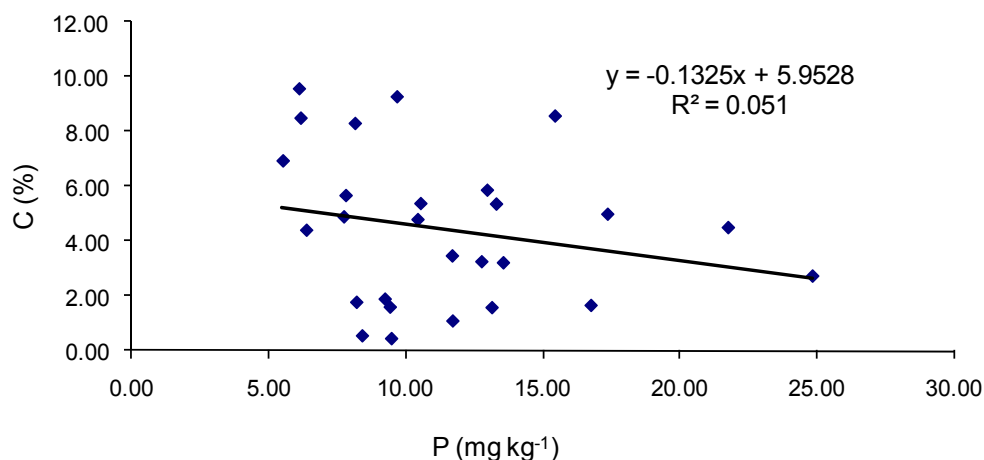


Figura 14. Relación del fósforo con el porcentaje de carbono a una profundidad de 0 – 30 cm.

7.2.5. Nitrógeno total y fósforo en hierbas

El contenido de nitrógeno y fósforo fue mayor en el estrato herbáceo del bosque de oyamel (153.2 kg ha^{-1} y 25.3 kg ha^{-1} , respectivamente) que en los estratos herbáceos de los otros tipos de vegetación (Cuadro 11), esto se explica porque en este bosque aunque se realizaron los muestreos en época de secas, la vegetación herbácea era abundante, particularmente de musgo (briofitas) y *Alchemilla procumbens*.

Cuadro 11. Nitrógeno y Fósforo (kg ha^{-1}) en la hierba de los 5 usos de suelo y cubierta vegetal.

Clases	Nitrógeno (N)	Fósforo (P)
Reforestación de cedro [†]		
<i>Promedio</i>	15.9 ± 5.3	2.2 ± 1.1
<i>Rango</i>	3.3 – 26.9	0.5 – 5.3
Bosque de encino [¶]		
<i>Promedio</i>	35.6 ± 9.5	6.5 ± 2
<i>Rango</i>	7.6 – 60.4	0.8 – 11.9
Bosque de oyamel [¶]		
<i>Promedio</i>	153.2 ± 6.2	25.3 ± 4.6
<i>Rango</i>	129 – 161.8	16 – 40.8
Bosque de pino [¶]		
<i>Promedio</i>	42.7 ± 6.9	5.9 ± 0.8
<i>Rango</i>	29.7 – 62.9	3.7 – 8
Pradera alpina [†]		
<i>Promedio</i>	62.3 ± 17.2	7.7 ± 2.2
<i>Rango</i>	36.9 – 113	2.7 – 13

[†]: 4 sitios de muestreo.

[¶]: 5 sitios de muestreo.

Promedio: Promedio del contenido de N y P en los sitios de muestreo.

±: Error estándar.

El carbono en las plantas se encuentra altamente relacionado con el nitrógeno, esto es debido a que el nitrógeno integra las cadenas de aminoácidos necesarios para formar las complejas proteínas que darán origen a los tejidos de las plantas. Para obtener el nitrógeno necesario algunas plantas mantienen relaciones simbióticas con los microorganismos del suelo que les permiten fijar este elemento. Gracias a este tipo de relaciones esas plantas presentan una alta eficiencia en la realización de sus procesos metabólicos, y como una consecuencia, su tasa fotosintética aumenta lo cual permitirá una mayor acumulación de carbono en los órganos de las plantas (Mooney, 1972). Esto se puede observar en los resultados de carbono en hierba donde se tiene que el oyamel que presentó mayor contenido de nitrógeno también tuvo mayor acumulación de carbono, seguido de pradera alpina, pino, encino y por ultimo reforestación de cedro.

VIII. CONCLUSIONES

El reservorio que presentó mayor almacenamiento de carbono en la mayoría de los sistemas forestales y agrícolas fue el suelo, excepto en el bosque de encino y oyamel que fue en el estrato arbóreo.

El bosque de oyamel es el que presentó mayor almacenamiento de carbono total (suelo, biomasa viva y muerta) con 432.4 Mg ha^{-1} . También presentó mayor contenido de nitrógeno con 153.2 kg ha^{-1} y mayor contenido de fósforo con 25.3 kg ha^{-1} en hierba.

El bosque de encino fue el que presentó mayor contenido de fósforo en el suelo con 80.3 kg ha^{-1} .

El área agrícola presentó mayor contenido de nitrógeno en el suelo a una profundidad de 0 a 30 cm con 93.3 kg ha^{-1} .

El suelo de la pradera alpina es el que presentó la mayor acumulación de carbono con 308.4 Mg ha^{-1} y mayor contenido de nitrógeno con 166.4 kg ha^{-1} a una profundidad de 0 a 60 cm.

La cantidad de nitrógeno y fósforo no influyen en el almacenamiento de carbono del suelo.

Hay una relación positiva y significativa entre el pH y el carbono del suelo; de igual forma entre la altitud y el carbono. Los pHs más ácidos se encuentran en suelos localizados a mayor altitud.

Los bosques (encino, oyamel y pino) y pradera alpina de la falda oeste del Cerro Tláloc, son un importante y gran sumidero de carbono que contribuyen a la mitigación de la emisión de gases de invernadero.

IX. RECOMENDACIONES

Muchos estudios incluyen sólo una profundidad de suelo de 0 a 30 cm, de acuerdo a los resultados obtenidos se recomienda incluir profundidades de 30 a 60 cm y en caso de suelos forestales profundos y con abundante materia orgánica incluir profundidades de 60 a 90 cm.

Determinar edad de los árboles para conocer la cantidad de carbono acumulado por año en la cubierta vegetal.

La zona de estudio de la falda oeste del Cerro Tláloc es un importante y gran sumidero de carbono, por lo que se recomienda, realizar un estudio de Servicios Ambientales para el Pago por Captura de Carbono y así contribuir a la conservación de los sistemas forestales y mitigación del cambio climático.

En áreas que estén destinadas a la reforestación con cedro, se recomienda plantar los árboles cada 2 m para asegurar la densidad de población, una vez que los árboles ya han sobrevivido se debe realizar un raleo para disminuir la competencia entre ellos, a una distancia de 4 metros para que tengan mayor espacio con lo que podrán desarrollarse mejor y no mueran por competencia de luz, agua y nutrientes por estar muy juntos y así tener mejor probabilidad de supervivencia a largo plazo.

En las áreas agrícolas que se encuentran dentro del bosque, se recomienda seguir manteniendo el bosque para que la productividad del área agrícola sea alta. Debido a que el bosque proporciona una mayor cantidad de nutrientes.

En las áreas agrícolas que no se encuentran dentro del bosque se recomienda, implementar Sistemas Agroforestales; por ejemplo, plantar árboles que sirvan de barrera rompevientos, para reducir la evaporación causada por vientos elevados y secos, reducir la cantidad de suelo erosionado y mejorar la fertilidad

del suelo y productividad. También se pueden crear cultivos en callejones, intercalando cultivos de avena con árboles frutales como durazno, manzana o ciruela, es decir árboles de clima templado con un requerimiento de horas frío acorde a las condiciones del lugar y así tener otros ingresos adicionales.

Los árboles deben tener un manejo agronómico adecuado para evitar la competencia entre los cultivos anuales y así elevar la producción. Si las parcelas son pequeñas para crear los callejones se pueden juntar varias parcelas y colocar los árboles frutales en los límites de cada parcela o colocar los árboles en hileras con una separación de 12 m entre hileras de árboles o bien, si es mecanizado, la distancia entre árboles esta en función de los pasos del tractor con implemento.

Los Sistemas Agroforestales, por combinar la producción de cultivos y árboles frutales o forestales, con el fin de optimizar la producción de propósito múltiple y llevarlo a un estado de producción sostenida; se consideran proveedores de Servicios Ambientales y entran en los estudios para el Pago por Captura de Carbono.

Para el caso de los cultivos anuales una opción es realizar rotaciones de cultivos las cuales pueden incluir alguna leguminosa para que ayude al suelo a recuperar nitrógeno, como el frijol o haba; por otro lado, se puede modificar el sistema actual de producción de los agricultores de este ejido, el cual se basa en la siembra de avena para forraje, se recomienda integrar una leguminosa como la veza que es un forraje con elevada calidad nutrimental, lo que permite que se incremente el costo unitario del forraje.

X. BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, M., J. Quednow, D. Etchevers y C. Monreal. 2002. Un método para la medición del carbono almacenado en la parte aérea de sistemas de vegetación natural e inducida en terrenos de ladera en México. 9-18 pp. In: J. Gayoso y R. Jandl. Simposio Internacional: Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales, Valdivia, Chile. IUFRO World Series 13, Vienna, Austria. Disponibles en: <http://www.iufro.org/publications/series/world-series/worldseries-13/>
- Aguilar, A. V. H. 2007. Almacenamiento de carbono en sistemas de pasturas en monocultivo y silvopastoriles, en dos comunidades de la selva lacandona, Chiapas, México. Tesis de Maestría Universidad Autónoma de Chapingo. 90 pp.
- Aguirre, D. C. M. 2006. Servicios Ambientales: Captura de carbono en sistemas de café baja sombra en Chiapas, México. Tesis de Maestría Universidad Autónoma de Chapingo. 85 pp.
- Almaraz J.J., X. Zhou C. Madramootoo Ma. B. Rochette P., and D. Smith. 2009. Carbon dioxide and nitrous oxide fluxes in corn grown under two tillage systems in southwestern Quebec. Soil Science Society of America Journal 73: 113-119.
- Anderson J. M. 1991. The effects of climate change on decomposition processes in grassland and coniferous forest. Ecological Applications 1: 326-347.
- Arriaga L., M. Espinoza, J., C. Aguilar., E. Martínez., L. Gómez., y E. Loa. 2000. Regiones terrestres prioritarias de México. Conabio, México. (Disponible en: www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/Tlistado).
- Ayala, L. R. S. 1998. Ecuaciones para estimar biomasa de pinos y encinos en la meseta central de Chiapas. Tesis de Licenciatura Universidad Autónoma de Chapingo, División de Ciencias Forestales. 70 pp.
- Bellón M.R., O. Masera R. and G. Segura. 1993. Response options for sequestering carbon in Mexican forests. Report al F-7 International Network on tropical Forestry and Global Climatic Change, Energy and Environment Division, Lawrence-Berkeley Laboratory, Environmental Protection Agency, Berkeley. 231 pp
- Bishop, J. y N. Landell-Mills. 2006. Los servicios ambientales de los bosques. Cap 2. Pagiola S., J. Bishop y N. Landell-Mills. (comp.). La Venta de Servicios Ambientales Forestales. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología. 2ª ed. 47-74:465.
- Brady, N. C. 2000. Elements of the nature and properties of soils. Prentice-Hall. New Jersey, USA 559 pp.
- Bremner, J. M. 1965. Total nitrogen. Pp 1149 – 1178. In: C. A. Black (comp.), Methods of soil analysis. Part 2. Agronomy 9. American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin.
- Broughton, W. J. 1981. Nitrogen Fixation. Vol 1 Ecology. Press Oxford. New York USA 306 pp.
- Brown, K and W. Neil-Adger. 1995. Economic and political feasibility of international carbon offsets. Revista Forest Ecology Management No 68.
- Brown, S. 1996a. Present and potential roles of forests in the global climate change debate. Unasylva 185: 3-10.
- Brown, S. 1996b. Tropical forests and the global carbon cycle: estimating state and change in biomass density. 133 – 144 pp In: Apps, M. J. & Price, D. T. (eds). Forest ecosystems, forest management and the global carbon cycle. Springer-Verlag. Berlin.
- Buchholz D. D. and N. C. Wollenhaupt. 1990. Varying fertilizer applications within a field. Better Crops with Plant Food 74(2):12-13.

- Cairns M. A., S. Brown H. Helmer E. and A. Baumgardner G. 1997. Root biomass allocation in the world's upland forest. *Oecologia* 111, 1-11.
- Callo, C. D. A. 2001. Cuantificación del carbono secuestrado por algunos sistemas agroforestales y testigos en tres pisos ecológicos de la Amazonía del Perú. Tesis de Maestría Universidad Autónoma de Chapingo. 72 pp.
- Campos C. A., K. Oleschko L., J. Etchevers B. y C. Hidalgo M. 2007. Exploring the effect of changes in land use on soil quality on the eastern slope of the Cofre de Perote Volcano (Mexico). *Forest Ecology and Management* 248 (2007) 174–182.
- CCMSS (2009). "Retos y oportunidades del sector forestal ante el cambio climático". Disponible en: www.ccmss.org.mx/modulos/biblioteca_consultar.php?folio=253
- COFOM, 1999. Nuestro bosque. Pilar del desarrollo sustentable de los michoacanos. El papel de los suelos Forestales en la Captura de Carbono. Vol. 1 Num 1, 22 pp.
- Cornelissen, J. H. C. 1996. An experimental comparison of leaf decomposition rates in wide range of temperate plant species and types. *J. Ecol.* 84:573-582.
- De Jong B., O. Masera y T. Hernández–Tejeda. 2004. Opciones de captura de carbono en el sector forestal. In, *Cambio Climático: Una visión desde México*. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) E Instituto Nacional de Ecología (INE). 1ª Ed. México. 369-380 pp.
- Delgadillo, R. M. y S. Quechulpa M. 2006. Manual de Monitoreo de Carbono en Sistemas Agroforestales. Comisión Nacional Forestal. AMBIO S. C. de R. L. 43 pp.
- Dlugokencky 2007. Las emisiones de metano aumentaron por primera vez desde 1998 y el CO₂ se eleva hasta 385 ppm. Disponible en <http://calentamientoglobalclima.org/category/calentamiento-global/> 24 de abril de 2008.
- Dumanski, J. 2004. Carbon sequestration, soil conservation, and the Kyoto Protocol: Summary of implications. *Climate Change* 65: 255 – 261.
- Elliot W. M., N. B. Elliot and R. L. Wyman. 1993. Relative effect of litter and forest type on rate of decomposition. *Am. Midl. Nat.* 129:89-95.
- ESRI, 1999. Environmental Systems Research Institute, Inc. ArcView GIS 3.2 [CD-ROM computer file].
- FAO, 2001. El cambio climático y los bosques. In: *Situación de los Bosques del Mundo 2001*. 60 – 73 pp. Disponible en <http://www.fao.org/Forestry/fo/sofo/SOFO2001/publ-s.stm>.
- FAO, 2006. Global Forest Resources Assessment 2005, Progress towards sustainable forest management. FAO Forestry Paper No. 147. Rome, Italy. 320 pp.
- Forsythe, W. 1972. Manual de Laboratorio de Física de Suelos. I.I.C.A. Turrialba, Costa Rica. 216 pp.
- García-Oliva F., F. Gallardo J., M. Montaña N., and P. Islas. 2006. Soil Carbon and nitrogen dynamics followed by a forest-to-pasture conversion in western Mexico. *Agroforestry Systems* 66:93-100.
- Gómez, D. J. D. 2008. Determinación de los almacenes de carbono en los compartimentos aéreos y subterráneos de 2 tipos de vegetación en la reserva de la biosfera "Sierra de Huautla", Morelos, México. Tesis de Doctorado. Colegio de posgraduados. 194 pp.
- González E. A. Ma. 2007 La frontera norte de México ante el cambio climático global y los mercados de carbono. *Nota Crítica. Frontera norte*, vol. 19, núm. 38, julio-diciembre de 2007.
- Harmon M. E, W. K. Ferrell and M. Herman. 2000. Managing forests after Kyoto. *Science* 289:2058-2059.
- Hattenschwiler S., V. Tiunov A. and S. Scheu. 2005. Biodiversity and litter decomposition in terrestrial ecosystems. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 36: 191–218.

- Hernán J. Andrade y I. Muhammad. 2003. ¿Cómo monitorear el secuestro de carbono en los sistemas silvopastoriles?. *Agroforestería en las Américas* Vol. 10 N° 39 - 40.
- Högberg M. N., P. Högberg and D. D. Myrold. 2007. Is microbial community composition in boreal forest soils determined by pH, C-to-N ratio, the trees, or all three? *Oecologia* 150:590–601.
- Houghton, R. A. 1996. Land-use change and terrestrial carbon: the temporal record. Pp. 117–134 in Apps, M. J. & Price, D. T. (eds). *Forest ecosystems, forest management and the global carbon cycle*. Springer-Verlag, Berlin.
- INEGI. 1997. Carta de uso de suelo y vegetación. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. [CD-ROM computer file]. Escala 1:250 000.
- INEGI. 2001. Síntesis de Información Geográfica del Estado de México. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 139 pp.
- IPCC. 2003. Good Practice Guidance for Land Use, land-Use Change and Forestry National Greenhouse Gas Inventories Programme. Kanagawa, Japan. Disponible en: <http://www.ipcc.ch>.
- IPCC. 2007. Climate Change 2007. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Solomon, S., D. Quin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B.M. Tignor and H.L. Miller (eds.)). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY. USA, 996 pp.
- Jackson, M. L. 1976. Análisis químico de suelos. Traducción al español por Beltrán M. J. 3ª ed. Ediciones Omega, S. A. Barcelona, España. 662 pp.
- Janzen H.H., and R.M.N. Kucey. 1988. C, N and S mineralization of crop residues as influenced by crop species and nutrient regime. *Plant Soil* 106:35–41.
- Jaramillo V. J; R. Ahedo-Hernández. and J. Boone K. 2003. Root biomass and carbon in a tropical evergreen forest of Mexico: changes with secondary succession and forest conversion to pasture. *Cambridge University Press* 19:457–465.
- Jaramillo, V. J. 2004. El ciclo global del carbono. Instituto de Ecología, UNAM. In: Martínez J., Fernández B. A., Osnaya P (comp.). *Cambio climático: una visión desde México*. Instituto Nacional de Ecología. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales 75-83:523 pp
- Jenkins J. C., C. Chojnacky, D., S. Heath, L. and A. Birdsey, R. 2003. National-scale biomass estimation for United States tree species. *Forest Science*. 49(1): 12-35.
- Kauffman J. B. and C. Uhl. 1990. Interaction of anthropogenic activities, fire, and rain forests in the Amazon Basin. Pp. 117-133 in Goldammer, J. G. (ed.). *Fire in the tropical biota: ecosystem processes and global challenges*. Ecological Studies 84. Springer-Verlag, New York.
- Kueppers L.M. and J. Harte. 2005. Subalpine forest carbon cycling: short- and long-term influence of climate and species. *Ecological Applications* 15(6): 1984-1999.
- Lal, R. 1999. Soil management and restoration for carbon sequestration to mitigate the accelerated greenhouse effect. *Prog. Env. Sci.* 1(4): 307 – 326.
- Lal, R. 2000. World cropland soils as a source or sink for atmospheric carbon. *Adv. Agron.* 71: 145–193.
- Lal, R. 2002. Why Carbon sequestration in Agricultural Soils. In: J. M. Kimble, R. Lal and R. F. Follett (eds), 2002. *Agricultural practices and policies for carbon sequestration in soil*. Lewis Publishers. Boca Raton, FL. 21 - 30 pp.
- Lal, R. 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304: 1623-1625.

- Lazcano, H. I. 2006. Estimación de secuestro de carbono para cuatro coníferas en la región de Chignahuapan, Puebla. Tesis de Maestría Universidad Autónoma Chapingo. 200 pp.
- Litynski J. T., M. Scott, K. McIlvried and S. Rameshwar D. 2006. An overview of terrestrial sequestration of carbon dioxide: The united states department of energy's fossil energy R&D program. *Climatic Change* 74: 81–95.
- López, R. 1997. Environmental externalities in traditional agriculture and the impact of trade liberalization: the case of ghana. *journal of development economics* 53: 17-39.
- MacDiken, K. 1997. A Guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects. Arlington,VA, US, Winrock International. 87 pp.
- Madigan, M. T. 2004. Brock biología de los microorganismos. 10ª ed. Pearson educación. New Jersey, Madrid. 1011 pp.
- Martínez, R. 2008. NOTICIAS OAXACA. Reciben comunidades pago por captura de carbono. Domingo 18 mayo de 2008.
- Mooney, H. A. 1972. The carbon balance of plants. *Annual review of ecology and systematics* 3(1972): 315-346.
- Myers, N. 1997. The world's forests and their ecosystem services. En: G. Daily (ed.). *Nature's services: societal dependence on natural ecosystems*. Washington: Island Press.
- Nair, K. 1993. An Introduction to agroforestry. Kluwer. Dordrecht, Holanda. 499 pp.
- Nobre, C.A., P.J. Sellers y J. Shukla. 1991. Amazonian deforestation and regional climate change. *journal of climate* 4: 957-988.
- Norma Oficial Mexicana. 2002. NOM-021-SEMARNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. Estados Unidos Mexicanos. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 85 pp.
- Oelbermann M., P. Vorone and M. Gordon A. 2004. Carbon sequestration in tropical and temperate agroforestry systems: a review with examples from Costa Rica and Southern Canada. *Agric.Ecosyst. Env.* 104: 359-377.
- Ordóñez J. A. B., B. H. J. De Jong, F. García-Oliva, F. L. Aviña, J. V. Pérez, G. Guerrero, R. Martínez and O. Masera. 2008. Carbon content in vegetation, litter, and soil under 10 different land-use and land-cover clases in the Central Highlands of Michoacan, Mexico. *Forest Ecology and Management* 255 (2008) 2074-2085.
- Ordóñez, B., H. J de Jong y O. Masera. 2001. Almacenamiento de carbono en un bosque de *Pinus pseudostrobus* en Nuevo San Juan, Michoacán. *Madera y Bosques* 7(2), 2001:27-47.
- Pacheco E., F.C., A. Aldrete., A. Gómez G., A. M. Fierros G., V. M. Cetina-Alcalá y H. Vaquera H. 2007. Almacenamiento de carbono en la biomasa aérea de una plantación joven de *Pinus Greggii* Engelm. *Rev. Fitotec. Méx.* Vol. 30 (3): 251-254.
- Paustian K., O. Andren, H. H. Janzen, R. Lal, P. Smith, G. Tian, H. Tiessen, M. van Noordwijk, and P.L. Wooner. 1997. Agricultural soils as a sink to mitigate CO₂ emissions. *Soil Use Manag.* 13:230-244.
- Pimienta de la Torre D. J., G. Domínguez C., O. A. Calderón, F. J. Hernández y J. Jiménez P. 2007. Estimación de biomasa y contenido de carbono de *Pinus cooperi* Blanco, en Pueblo Nuevo, Durango. *Madera y Bosques* 13(1):35-46.
- Plan Estatal de Desarrollo Urbano. 2008. Gobierno del Estado de México. Toluca, México.

- Porta J., M. López-Acebedo y C. Roquero. 2003. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. 3ª edición. Grupo Mundi – Prensa. México, S. A. de C. V. 895 pp.
- Rasse D.P., C. Rumpel and M. F. Dignac. 2005. Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilization. *Plant Soil* 269:341-356.
- Reeder J. D., C. D. Franks y D. G. Milchunas. 2001. Root biomass and microbial processes. En: R.F. Follet, J. M. Kimble y R. The potential of U.S. grazing lands to sequester carbon and mitigate the greenhouse effect. Lewis Publishers, Boca Ratón, 139-166 pp.
- Rodríguez T. D. A., M. Rodríguez A. and F. Fernández S. 2002. Educación e incendios forestales. Con un capítulo escrito por Stephen J. Pyne. 2ª ed. Mundi-Prensa. México, D. F. Madrid. Barcelona. 201 pp.
- Ruiz, G. A. 2002. Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas silvopastoriles y competitividad económica en Matiguás, Nicaragua. CATIE. Turrialba Costa Rica. 106 pp.
- Sánchez G. A. y López, M. L. 2003. Clasificación y ordenación de la vegetación del norte de la Sierra Nevada, a lo largo de un gradiente altitudinal. *Anales del Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, D.F. Serie Botánica* 74(1): 47-71.
- Sánchez G. A., L. López M. y H. Vibrans. 2006. Composición y patrones de distribución geográfica de la flora del bosque de oyamel del cerro Tláloc, México. *Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal. Universidad Autónoma del Estado de México. Serie Botánica* 79: 67-78
- Schlegel B., J. Gayoso y J. Guerra. 2001. Manual de Procedimientos para Inventarios de Carbono en Ecosistemas Forestales. Medición de la capacidad de captura de carbono en bosques de Chile y promoción en el mercado mundial. Universidad Austral De Chile. Proyecto FONDEF D9811076. Valdivia, Enero 2001. 15 pp.
- Schlesinger, W. H. 1997. Biogeochemistry: An analysis of global change. National Academic Press. New York, US.
- Stefano P., B. Joshua y N. Landell M. 2006. La venta de servicios ambientales forestales. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. INE. 2ª Edición. México, D. F. 463 pp.
- Tan, K. H. 1996 Soil sampling preparation, and analysis. Marcel Dekker, Inc. New York Basel Hong Kong. 408 pp.
- Tisdale S. L. y L. Nelson W. 1982. Fertilidad de los suelos y fertilizantes. Ed. Hispano-Americana Uteha. 760 pp.
- Watson, R. T., 1996. Tecnologías, políticas y medidas para mitigar el cambio climático. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. PNUMA. 102 pp.
- Winjum J. K., K Dixon R. and E Schroeder P. 1992. Estimating the global carbon forest and agroforestry management practice to sequester carbon. *Water, Air Soil Pollut.* 64: 213-227.
- Zak D.R., D. Tilman., R. Parmenter R., W. Rice C., M. Fisher F., J. Vose., D. Milchunas and W. Martin, C. 1994. Plant production and soil microorganisms in late-succesional ecosystems: a continental-scale study. *Ecology* 75(8): 2333-2347.

XI. ANEXOS

Anexo 1. Localización geográfica de los sitios de muestreo en el Ejido de San Pablo Ixayoc hasta el Cerro Tláloc en el municipio de Texcoco, Estado de México.

Sitios de muestreo	Coordenadas	Elevación (m)
Cultivo 1	N19 27.964 W98 47.649	2642
Cultivo 2	N19 27.990 W98 47.793	2626
Cultivo 3	N19 26.853 W98 46.378	2979
Cultivo 4	N19 26.792 W98 46.300	2986
Reforestación 1	N19 27.362 W98 47.072	2806
Reforestación 2	N19 27.454 W98 47.080	2778
Reforestación 3	N19 27.414 W98 47.115	2803
Reforestación 4	N19 27.447 W98 47.173	2771
Encino 1	N19 26.700 W98 46.133	2991
Encino 2	N19 26.932 W98 46.028	2958
Encino 3	N19 27.370 W98 46.740	2832
Encino 4	N19 27.979 W98 46.704	2726
Encino 5	N19 27.153 W98 46.711	2885
Oyamel 1	N19 25.609 W98 45.785	3489
Oyamel 2	N19 25.821 W98 45.002	3360
Oyamel 3	N19 26.071 W98 45.103	3359
Oyamel 4	N19 26.023 W98 45.404	3359
Oyamel 5	N19 26.305 W98 45.610	3093
Pino 1	N19 25.390 W98 45.163	3906
Pino2	N19 25.764 W98 45.451	3935
Pino 3	N19 25.832 W98 45.942	3827
Pino 4	N19 25.272 W98 45.373	3675
Pino 5	N19 25.124 W98 45.532	3683
Pradera alpina 1	N19 25.846 W98 45.058	4063
Pradera alpina 2	N19 25.900 W98 42.946	4077
Pradera alpina 3	N19 25.856 W98 42.827	4081
Pradera alpina 4	N19 25.783 W98 42.679	4127

Fuente: Datos obtenidos GPS Garmin

Anexo 2. Fotos de los sitios de muestreo.



Área reforestada de Cedro
(*Cupressus lusitanica*)



Bosque de Encino
(*Quercus rugosa* y *Quercus laurina*)



Bosque de Oyamel (*Abies religiosa*)



Bosque de Pino (*Pinus harwegii*)



Área agrícola



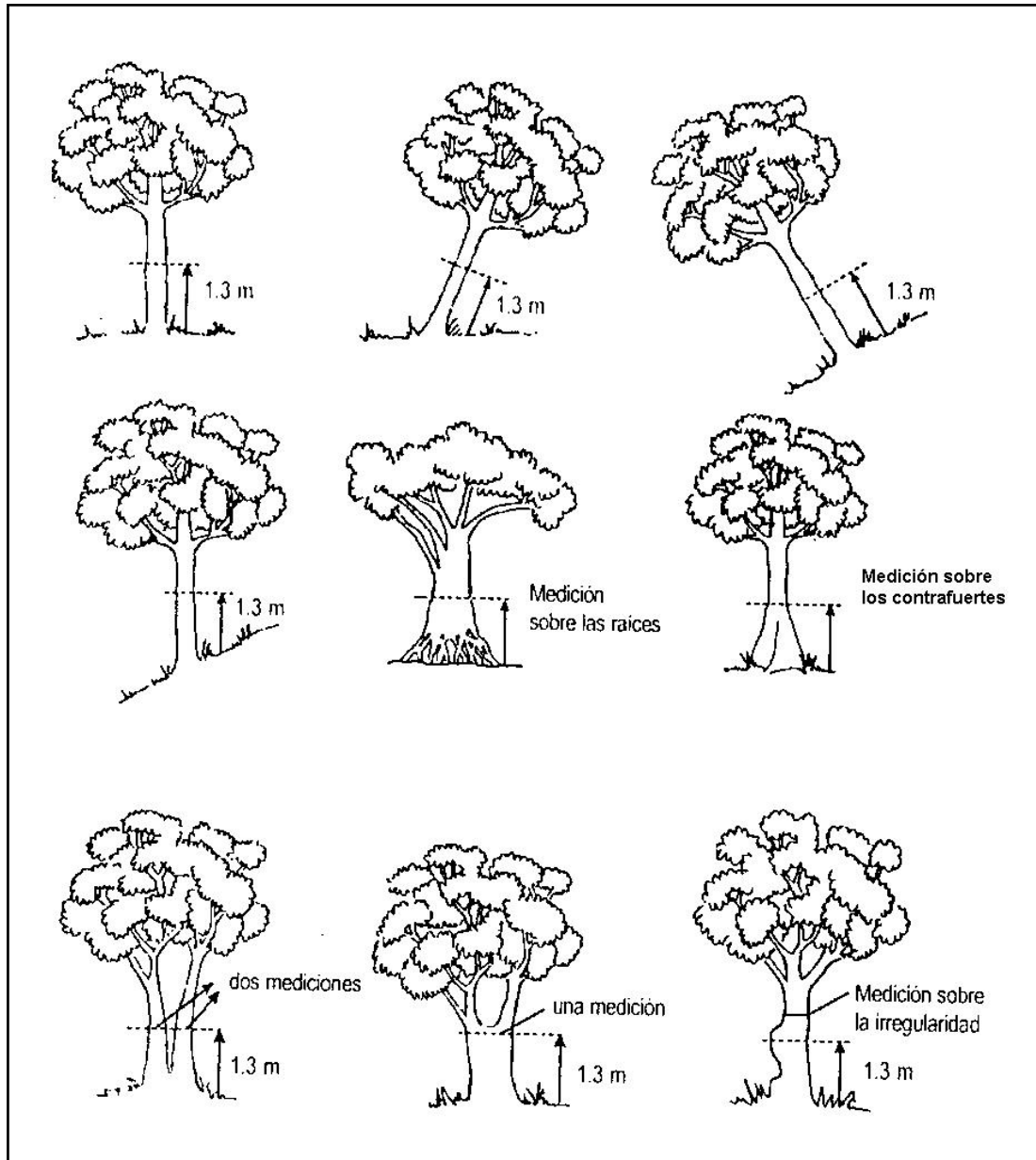
Pradera Alpina (*Agrostis tolucensis*,
Alchemilla procumbens, *Calamagrostis*
intermedia, *Gnaphalium liebmannii*)

Anexo 3. Tabla de corrección de distancias por pendiente (%). Los datos en las columnas están en metros de distancia sobre el terreno. Estos valores corresponden al radio (distancia del centro hacia los extremos) de parcelas circulares con diferentes áreas.

Pendiente (C%)	Circulo 4 m ²	Circulo 8 m ²	Circulo 100 m ²	Circulo 500 m ²	Circulo 1000 m ²
0	1.13	1.60	5.64	12.62	17.84
2	1.13	1.60	5.64	12.62	17.84
4	1.13	1.60	5.65	12.63	17.86
6	1.13	1.60	5.65	12.64	17.87
8	1.13	1.60	5.66	12.66	17.90
10	1.13	1.60	5.67	12.68	17.93
12	1.14	1.61	5.68	12.71	17.97
14	1.14	1.61	5.70	12.74	18.02
16	1.14	1.62	5.71	12.78	18.07
18	1.15	1.62	5.73	12.82	18.13
20	1.15	1.63	5.75	12.87	18.19
22	1.16	1.63	5.78	12.92	18.27
24	1.16	1.64	5.80	12.97	18.35
26	1.17	1.65	5.83	13.04	18.43
28	1.17	1.66	5.86	13.10	18.53
30	1.18	1.67	5.89	13.17	18.63
32	1.18	1.68	5.92	13.25	18.73
34	1.19	1.69	5.96	13.32	18.84
36	1.20	1.70	6.00	13.41	18.96
38	1.21	1.71	6.04	13.50	19.09
40	1.22	1.72	6.08	13.59	19.22
42	1.22	1.73	6.12	13.68	19.35
44	1.23	1.74	6.16	13.78	19.49
46	1.24	1.76	6.21	13.89	19.64
48	1.25	1.77	6.26	13.99	19.79
50	1.26	1.78	6.31	14.10	19.95
52	1.27	1.80	6.36	14.22	20.11
54	1.28	1.81	6.41	14.34	20.28
56	1.29	1.83	6.47	14.46	20.45
58	1.30	1.84	6.52	14.58	20.62
60	1.32	1.86	6.58	14.71	20.81
62	1.33	1.88	6.64	14.84	20.99
64	1.34	1.89	6.70	14.98	21.18
66	1.35	1.91	6.76	15.12	21.38
68	1.36	1.93	6.82	15.26	21.58
70	1.38	1.95	6.89	15.40	21.78
72	1.39	1.97	6.95	15.55	21.98
74	1.40	1.99	7.02	15.69	22.19
76	1.42	2.00	7.09	15.85	22.41

Fuente: Delgadillo, R. M. y Quechulpa M. S. 2006. Manual de Monitoreo de Carbono en Sistemas Agroforestales. Comisión Nacional Forestal. AMBIO S. C. de R. L. 43 pp.

Anexo 4. Medición del diámetro a la altura del pecho en árboles con diferentes formas de fuste.



Fuente: Camacho, M. (comp.). 2000. Parcelas permanentes de muestreo en bosque natural tropical. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, CATIE. Unidad de Manejo de Bosques Naturales. Turrialba, Costa Rica. Pp. 12