



---

---

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA**

**ESTIMACIÓN DE LINEAS BASE DEL CONTENIDO DE CARBONO ORGÁNICO  
DEL SISTEMA SUELO-PLANTA EN UN AMBIENTE RIBEREÑO DEL RÍO  
AMECAMECA**

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

**PRESENTAN:**

**ESCALANTE VÉLEZ KARINA ANTONIETA**

**GONZÁLEZ MANCILLA DAFNE**

**Director de tesis: Dr. GERARDO CRUZ FLORES**



**MÉXICO DF A 6 DE NOVIEMBRE DEL 2013**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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



---

## Agradecimientos

A la **Universidad Nacional Autónoma de México**, porque en esta gran institución vivimos nuestras primeras experiencias de vida como adultas, porque cada una de tus cátedras nos enseñaron mucho sobre la vida, en ti forjamos nuestro carácter, conocimos gente con diferentes criterios, nos enseñaste a valorar y a ser valoradas, nos enseñaste a ser nobles y sobre todo nos diste un hogar donde recibimos el mejor de los regalos “educación” gracias UNAM somos orgullosamente azul y oro.

A la **Faculta de Estudios Superiores Zaragoza** que nos guió en el camino de una profesión, nos brindó las herramientas para superar nuestras metas, y sobre todo porque en ti conocimos amigos que se convirtieron en familia, que siempre nos dieron valores éticos y nos ayudaron en este camino.

Al jurado **M. en C. Ramiro Ríos Gómez, Dr. Gerardo Cruz Flores, Dr. Efraín Reyes Ángeles Cervantes, Biól. Maricela Arteaga Mejía y Biól. Juan Manuel Valderrábano Gómez**, por todas sus observaciones que nos permitieron enriquecer este trabajo.

Al **Dr. Gerardo Cruz Flores**, por ser un gran maestro, gracias por permitirnos ser parte de su grupo de trabajo, por confiar en nosotras, por las horas de enseñanza, por su paciencia, por su experiencia.

Al **Dr. Efraín Reyes Ángeles Cervantes**, por ser un gran maestro, una guía y un ejemplo, por ser un apoyo y por estar siempre al pendiente de nosotras, pero sobre todo por ser nuestro amigo.

A los maestros que de alguna forma fueron un gran apoyo en nuestro camino, **Biól. Ma. de Los Ángeles Galván Villanueva Ángeles, Biól. José Luis Guzmán Santiago, Biól. Maricela Arteaga Mejía, Dra. Esther Martiana García Amador, Biól. Juan Manuel Valderrábano Gómez, M. en C. Jorge Alberto Gutiérrez Gallegos, Dra. Socorro Almazán Orozco**

Al equipo de trabajo del Laboratorio de Edafología y Nutrición Vegetal.

A nuestra querida amiga **Irma Garibay Navarrete** por ser incondicional, en esta última etapa de nuestra formación profesional.

---



---

## ÍNDICE

<b>ÍNDICE DE CUADROS</b>	<b>iv</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>v</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>1</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>2</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>3</b>
<b>2. MARCO TEÓRICO</b>	<b>6</b>
2.1. Líneas base de contenido de Carbono	6
2.2. El sector forestal como sumidero de C	7
2.3. México y sus ecosistemas forestales	9
2.4. Los bosques y su importancia en el ciclo de C	11
2.5. Régimen de propiedad de los bosques de México	13
2.6. Ecosistemas ribereños como sumideros de C	13
2.7. Flujos de CO <sub>2</sub> y captura unitaria en ecosistemas forestales ribereños	15
2.8. Dinámicas del C orgánico en el suelo y la vegetación	16
2.9. Materia orgánica y procesos de transformación del C en el suelo	18
2.10. Captura de C una opción para mitigar el Cambio Climático	20
2.11. Servicios Ambientales (SA) en México	24
2.12. Pago por Servicios Ambientales (PSA) en México	27
<b>3. JUSTIFICACIÓN</b>	<b>29</b>
<b>4. OBJETIVO GENERAL</b>	<b>29</b>
<b>5. OBJETIVO PARTICULARES</b>	<b>29</b>
<b>6. HIPÓTESIS</b>	<b>30</b>
<b>7. ÁREA DE ESTUDIO</b>	<b>30</b>
<b>8. MÉTODOS</b>	<b>38</b>
8.1. Delimitación del área de estudio	38
8.2. Registro de datos en campo para cuantificación de C en estrato arbóreo	40
8.3. Toma de muestras de vegetación arbustiva para cuantificar C	41



---

<b>8.4. Toma de muestras de suelo, mantillo y capa de fermentación del suelo</b>	<b>42</b>
<b>8.5. Análisis de laboratorio</b>	<b>44</b>
<b>8.5.1. Pretratamiento y procesamiento de muestras</b>	<b>44</b>
<b>8.5.2. Análisis físicos del suelo</b>	<b>44</b>
<b>8.5.3. Análisis químico del suelo</b>	<b>45</b>
<b>8.6. Fase de gabinete</b>	<b>45</b>
<b>9. RESULTADOS</b>	<b>47</b>
<b>9.1. Descripción sitios de estudio</b>	<b>47</b>
<b>9.2. Carbono almacenado en los diferentes compartimentos del sistema ribereño a través del gradiente altitudinal</b>	<b>52</b>
<b>9.3. Carbono almacenado en los diferentes compartimentos del sistema ribereño a 1 m y a 5 m de amplitud del afluente</b>	<b>58</b>
<b>9.4. Parámetros nutrimentales de suelo y capa de fermentación, relacionados con amplitudes a 1 y 5 metros al afluente Chopanac</b>	<b>62</b>
<b>10. DISCUSIÓN</b>	<b>67</b>
<b>10.1. Contenidos de C en función de la altitud y bajo diferente uso de suelo</b>	<b>67</b>
<b>10.2. Parámetros físicos, químicos y nutrimentales del suelo y la capa de fermentación del suelo, en los diferentes compartimentos de los sistemas ribereños en función de la altitud y bajo diferente uso de suelo</b>	<b>74</b>
<b>10.3. Contenidos de C en diferentes compartimentos de sistemas ribereños en función de la amplitud y bajo diferente uso de suelo</b>	<b>80</b>
<b>10.4. Parámetros físicos, químicos y nutrimentales del suelo y la capa de fermentación del suelo, en los diferentes compartimentos de los sistemas ribereños en función de la amplitud y bajo diferente uso de suelo</b>	<b>81</b>
<b>10.5. Pago de servicios ambientales, desarrollo de la idea del proyecto de secuestro de carbono</b>	<b>84</b>
<b>11. CONCLUSIONES</b>	<b>88</b>
<b>13. REFERENCIAS</b>	<b>90</b>

---



---

<b>14. ANEXOS</b>	<b>102</b>
1. Técnicas de análisis de suelos.	102
2. Especies vegetales encontradas a lo largo de la zona ribereña del afluente Chopanac.	109
3. Sistema SAS, Procedimiento CORR, Estadísticos simples	112
4. Resumen del análisis de varianza de las propiedades físicas y químicas del suelo y capa de fermentación en diferentes compartimientos de sistemas ribereños en bosques templados.	112
5. Estadísticos simples de carbono orgánico almacenado a 1 y 5 metros del afluente Chopanac.	113
6. Red hidrográfica de alimentación del afluente Chopanac.	114
7. Álbum fotográfico.	115
8. Mecanismo de pago por servicios ambientales REDD+ en México	117



---

## ÍNDICE DE CUADROS

### Cuadro

1. Relación entre el ciclo de la MOS, la clase de drenaje y clima.	19
2. Comunidades vegetales y especies dominantes correspondientes con gradiente altitudinal del Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl (CONANP, 2013).	35
3. Descripción de las características generales de los sitios de estudio.	49
4. Propiedades físicas y químicas determinadas para el estudio del sistema ribereño del afluente Chopanac.	50
5. Estadísticos simples de C orgánico almacenado a 1 y 5 m del sistema Chopanac a través del gradiente altitudinal.	51
6. Registro diamétrico, densidad de madera y factor de expansión para la estimación de C en vegetación arbórea.	51
7. Contenidos totales de C por hectárea en sitios ribereños ubicados en un gradiente altitudinal con diferente tipo de vegetación del afluente Chopanac.	52
8. Contenidos de N, P y valor de la razón C:N en sitios ribereños ubicados en un gradiente altitudinal con diferente tipo de vegetación del afluente Chopanac.	55
9. pH activo y potencial y C.E. en sitios ribereños ubicados en un gradiente altitudinal con diferente tipo de vegetación del afluente Chopanac.	56
10. Contenidos de C por hectárea a 1 y 5 m de amplitud del afluente en las zonas ribereñas del río Chopanac.	58
11. Contenidos de N, P y valor de la razón C:N en suelo y capa de fermentación del suelo a 1 y 5 m de amplitud del afluente en las zonas ribereñas del río Chopanac.	59
12. Valores de pH (H <sub>2</sub> O), pH (KCl) y CE a 1 y 5 m de amplitud del afluente en las zonas ribereñas del río Chopanac.	60
13. Servicios Ambientales implementados en México (CONAFOR, 2013).	85



---

## ÍNDICE DE FIGURAS

### Figura

1. Mapa de uso de suelo y zonificación forestal (CONAFOR, 2013).	10
2. Principales áreas forestales degradadas e intactas del planeta (Greenpeace y Centro de Conservación de la Biodiversidad y Unión Socio Ecológica Internacional).	12
3. Representación de una zona ribereña.	13
4. Flujos y almacenes de C en un ecosistema forestal (Ordoñez, 1999).	15
5. Variedad de organismos que viven y constituyen importantes flujos de transformación en el suelo (Margalef, 1992).	17
6. Dinámica del C orgánico en el suelo (FAO, 2000).	20
7. Temperatura y concentración del CO <sub>2</sub> en la atmósfera durante los últimos 400 000 años, del núcleo de hielo de Vostok (Estrada, 2001).	21
8. Ubicación del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl y sitios de estudio.	31
9. Sitios de estudio con diferente uso de suelo en un gradiente altitudinal.	38
10. Imágenes de las zonas ribereñas muestreadas.	39
11. Representación de diseño de la zona de muestreo de vegetación arbórea (10 m × 30 m).	40
12. Registro de perímetro a la altura del pecho.	40
13. Cuadrantes para toma de muestras de vegetación arbustiva 1m <sup>2</sup> .	41
14. Cuadrantes para toma de muestras de mantillo, capa de fermentación del suelo y suelo a 1 y 5 m de amplitud.	42
15. Diagrama de flujo de muestreo y colecta de mantillo, capa de fermentación del suelo y suelo.	43
16. Sitios de muestreo ubicados a lo largo de la zona ribereña del sistema Chopanac, vertiente del río Amecameca (Google earth, 2012).	48
17. Cantidades de carbono orgánico acumulado en diferentes compartimentos de la zona ribereña en un gradiente altitudinal.	54



- 
- 18.** Carbono almacenado a 1 m y a 5 m de amplitud del afluente de los diferentes componentes del sistema ribereño a) En suelo de 0-20 cm de profundidad (COS), b) En capa de fermentación del suelo (Ccf), c) En mantillo (Cm) y d) En vegetación arbustiva (Cva). **61**
- 19.** Nitrógeno total a 1 m y a 5 m de amplitud del afluente de los diferentes componentes del sistema ribereño. a) En suelo 0-20 cm profundidad (Ns), y b) En capa de fermentación del suelo (Ncf). **63**
- 20.** Fósforo extractable a 1 y 5 m de amplitud del afluente en los diferentes sitios de estudio. a) En suelo de 0-20 cm de profundidad (Ps) y b) En capa de fermentación del suelo (Pcf). **63**
- 21.** Relación C:N en los compartimentos suelo y capa de fermentación del suelo a 1 y 5 m de amplitud del afluente en los diferentes sitios de estudio. a) En suelo 0-20 cm profundidad (C:Ns) y b) En capa de fermentación del suelo (C:Ncf). **64**
- 22.** pH potencial y activo en los compartimentos suelo y capa de fermentación a 1 y 5 m de amplitud del afluente en los diferentes sitios de estudio. a) pH potencial del suelo 0-20 cm de profundidad (pH(KCl 1N)s), b) pH activo del suelo 0-20 cm de profundidad (pHs), c) pH potencial de la capa de fermentación del suelo (pH(KCl 1N)cf), d) pH activo de la capa de fermentación del suelo (pHcf). **65**
- 23.** Conductividad Eléctrica de los compartimentos suelo y capa de fermentación a 1 y 5 m de amplitud del afluente en los diferentes sitios de estudio. a) En suelo 0-20 cm de profundidad (CEs), b) En capa de fermentación del suelo (CEcf). **66**



## RESUMEN

Se estudiaron los contenidos de C orgánico del suelo (COS), capa de fermentación del suelo (Ccf), mantillo (Cm), vegetación arbustiva (Cva) y vegetación arbórea (CvA) en sitios de bosques templados adyacentes al río Amecameca (sistema Chopanac) con diferente estado de conservación, se seleccionaron seis sitios de muestreo distribuidos de 2475 a 3224 m, donde los tipos de vegetación que dominan son: *Abies religiosa* a 3224 m y 3028 m, *Quercus* a 2880 m, *Quercus-Pinus ayacahuite* a 2670 m, *Pinus ayacahuite* a 2660 m y *Buddleia cordata* a 2470 m. La descripción de sitios y toma de muestras se realizó entre noviembre del 2010 y febrero de 2012. Además de la caracterización ecológica del sitio y evaluación de otras propiedades físicas, químicas y nutrimentales, se planteó un diseño experimental utilizando cuadros de 30 m × 2 m y de 30 m × 10 m (a 1 m y 5 m de los márgenes del afluente). Se colectaron muestras simples, a partir de las cuales se formaron muestras compuestas de suelo de 0-20 cm de profundidad además de capa de fermentación del suelo y mantillo en cuadros de 25 cm × 25 cm. Se cuantificó biomasa de vegetación arbustiva en cuadros de 1 m<sup>2</sup> y vegetación arbórea en un cuadro de 30 m × 10 m. Para estimar Cm, Cva y Ccf, las muestras se deshidrataron, para conocer COS se utilizó el método de Walkley y Black y para CvA se utilizaron ecuaciones alométricas. El promedio general del contenido de C orgánico a través del gradiente altitudinal fue de 130 Mg ha<sup>-1</sup>, donde la mayor acumulación estuvo en suelo (99 Mg ha<sup>-1</sup>), seguido de la vegetación arbórea (22.8 Mg ha<sup>-1</sup>), mantillo (8.1 Mg ha<sup>-1</sup>), capa de fermentación del suelo (3.6 Mg ha<sup>-1</sup>) y vegetación arbustiva (0.8 Mg ha<sup>-1</sup>). También los resultados de las comparaciones por amplitud del cauce mostraron que la cantidad de C orgánico acumulado a 5 m de distancia del cauce, en suelo y mantillo (100.2 Mg ha<sup>-1</sup> y 10.5 Mg ha<sup>-1</sup>) fueron mayores con respecto al acumulado a 1 m (92.3 Mg ha<sup>-1</sup> y 5.8 Mg ha<sup>-1</sup>), sin embargo, estas no mostraron diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) y en los compartimentos, capa de fermentación del suelo y vegetación arbustiva, la mayor acumulación de C orgánico fue a 1 m de distancia del cauce (3.8 Mg ha<sup>-1</sup> y 0.9 Mg ha<sup>-1</sup>) con respecto al acumulado a 5 m (3.5 Mg ha<sup>-1</sup> y 0.7 Mg ha<sup>-1</sup>), sin embargo, tampoco existe diferencia significativa.



## ABSTRACT

In order to estimate carbon contents in soil (S\_C), O\_layer (O-l\_C), litter (l\_C), shrubs and arboreal vegetation (va\_C and vA\_C) in temperate forest on sites adjacent to Chopanac river with different land use, was conducted this research at six sites in altitudinal range between 2475 and 3224 m.a.s.l. where vegetation types that dominate are: *Abies religiosa* to 3224 m.a.s.l. and 3028 m.a.s.l., *Quercus* to 2880 m.a.s.l., *Quercus-Pinus ayacahuite* to 2670 m.a.s.l., *Pinus ayacahuite* to 2660 m.a.s.l. and *Buddleia cordata* to 2470 m.a.s.l. Description of sampling sites, was conducted between November 2010 and February 2012. In addition to characterizing ecologically each site were evaluated physical, chemical and nutritional properties, within experimental design on quadrants 30 m × 2 m and 30 m × 10 m (in stripes 1 and 5 m in both sides of the tributary). Composite samples were collected from 0-20 cm soil depth plus O-layer and litter in boxes 25 cm × 25 cm. Was quantified, shrubs biomass in 1 m<sup>2</sup> quadrants and arboreal vegetation on transects 30 m × 10 m. To estimate l, va\_C and O-l\_C, samples were dehydrated and for S\_C, we used the Walkley & Black method and allometric equations were used for vA\_C. The average organic C content across the altitudinal gradient was 130 Mg ha<sup>-1</sup>, where the greatest accumulation, was in soil (99 Mg ha<sup>-1</sup>), followed by arboreal vegetation (22.8 Mg ha<sup>-1</sup>), mulch (8.1 Mg ha<sup>-1</sup>) O-layer (3.6 Mg ha<sup>-1</sup>) and the shrubs vegetation (0.8 Mg ha<sup>-1</sup>). Also the results of the riverbed amplitude comparisons showed that the amount of accumulated organic C to 5 m from the tributary, in soil and litter (100.2 Mg ha<sup>-1</sup> and 10.5 Mg ha<sup>-1</sup>) were higher with respect to accumulated to 1 m (92.3 Mg ha<sup>-1</sup> y 5.8 Mg ha<sup>-1</sup>), but these were not significantly different ( $p \leq 0.05$ ) and in the compartments, O-layer and shrubs vegetation, the greater accumulation of organic C was at 1 m distance from the riverbed (0.9 Mg ha<sup>-1</sup> and 3.8 Mg ha<sup>-1</sup>) with respect to accumulated at 5 m (0.7 Mg ha<sup>-1</sup> and 3.5 Mg ha<sup>-1</sup>) but no significant difference.



## 1. INTRODUCCIÓN

Un Servicio Ambiental (SA) que proporcionan los ecosistemas, es la captura de C y para estimar la cantidad almacenada, es necesario establecer las líneas base determinando la situación actual de sus almacenes, con base en los patrones convencionales de uso del suelo y aprovechamiento del bosque (Franco, 2009); la captura de C como SA ayuda a disminuir el calentamiento global producto del Cambio Climático (CC) mediante la “fijación” de CO<sub>2</sub> atmosférico por los organismos autótrofos que lo retienen en su biomasa (Pérez *et al.*, 1998, Lal, 2008), contribuyendo a la regulación ambiental debido a que es uno de los principales Gases de Efecto Invernadero (GEI) y sus concentraciones atmosféricas se han elevado de 280 a 360 ppm desde 1860 a la actualidad (Ordoñez, 1999; Lal, 2008).

Para 1995, México contribuyó con 1.45 % de las emisiones totales de C en la atmósfera (IPCC, 1995; Ordoñez y Macera, 2001) y actualmente, éstas se elevaron a 1.6% del total mundial (Elvira, 2009). Las implicaciones ambientales, sociales y económicas, a escala regional, nacional y global que tiene este aumento en las concentraciones de CO<sub>2</sub> atmosférico, han hecho que los gobiernos del mundo lo incorporen en sus diferentes agendas en los últimos años. Una de las opciones de mitigación más importantes especialmente para México es la denominada “captura de carbono en el sector forestal”, que tiene su base en el manejo sustentable de los bosques con estrategias de forestación y reforestación (Ordoñez, 1999) para promover la creación de sumideros de C, entendiendo por sumidero a “cualquier proceso, actividad o mecanismo que absorba un GEI de la atmósfera” (ONU, 1992; González *et al.*, 2005). Los sistemas capaces de generar este flujo de C son en mayor medida los océanos y los bosques. Aunque los océanos son los principales sumideros naturales de C del planeta y absorben alrededor de 50% del emitido a la atmósfera en forma disuelta o mineral, tanto por el plancton como los corales, la fijación del C por parte de estos, además de ser difícil de cuantificar, no depende directamente de la actividad humana, por lo que el protocolo de Kioto considera como sumideros de C a las actividades de uso agrícola del suelo, el cambio del uso del suelo y la silvicultura, tomando a los bosques como los principales sumideros de GEI (McNeil *et al.*, 2003; Wilson *et al.*, 2009).



Los bosques se han definido como “fábricas de agua” ya que tienen la capacidad de absorber cuatro veces más agua de lluvia que otros ecosistemas, porque sus suelos se encuentran cubiertos de espesa vegetación. Dentro de los bosques, se distinguen las zonas ribereñas como áreas contiguas a cuerpos de agua lóticos o lenticos y cuyo ambiente es distintivamente influenciado por dicha proximidad (Bren, 1993; Sethuram *et al.*, 2007).

Estas zonas están compuestas por comunidades vegetales exuberantes, caracterizadas por su mayor altura y densidad de vegetación, cantidad de biomasa, complejidad estructural, número de especies siempre verdes en comparación con su entorno (Morales y Fernández, 2006).

Por lo anterior los ambientes ribereños tienen un papel particularmente importante reteniendo parte del N y P transportados por la escorrentía desde los cultivos hasta los cuerpos de agua. También poseen un “poder tampón”, es decir, tienen la capacidad de absorber y almacenar elementos (N, P, S, Ca, Mg, Na, etc.); permiten restaurar la calidad de aguas superficiales además de evitar azolves de cuerpos de agua en cuencas bajas; reducen la temperatura del ambiente, los riesgos de erosión y ofrecen un “hábitat” a muchas especies vegetales y animales (Sethuram *et al.*, 2007).

Los ambientes ribereños son importantes como sitios de captura de GEI y como zonas que pueden integrarse a proyectos de Pago por Servicios Ambientales (PSA) que promueven principalmente la conservación (Hardner y Rice, 2002; Ferraro y Kiss, 2002; Niesten y Rise, 2004) haciendo que los beneficiarios paguen de manera directa, contractual y condicionada a los propietarios y usuarios locales por adoptar prácticas que aseguren la conservación y la restauración del ecosistema (Wunder, 2006). Sin embargo, a pesar de la importancia del recurso hídrico, la falta de información y estudios de estos sistemas, hace que cada vez sea mayor la presión sobre los ambientes ribereños, los cuales son afectados por el cambio de uso de suelo del sector forestal hacia un uso agropecuario o urbano, disminuyendo drásticamente la tasa de secuestro de CO<sub>2</sub> y por lo tanto su valor ambiental.

En estas zonas como en todos los sistemas forestales los principales almacenes de C son la vegetación, el suelo, la capa de fermentación del suelo y el mantillo (Ordoñez *et al.*, 2001).



La vegetación es la encargada de incorporar el C atmosférico al ciclo biológico por medio de la fotosíntesis (Apps *et al.*, 1993; Brown *et al.*, 1993; Dixon *et al.*, 1994), mientras que en el suelo, esto sucede a través del aporte de la M.O. en descomposición por la microflora, siendo ésta el proceso más importante (Pérez *et al.*, 1998).

Un valioso aporte para el manejo de las zonas ribereñas, es la estimación de la captura potencial de C en suelo, vegetación y mantillo. En cuanto a la capa de fermentación del suelo y mantillo, éstos más que absorber CO<sub>2</sub> de la atmósfera tienen la capacidad de almacenarlo por tiempo indefinido, antes de liberarlo de nuevo al sistema o integrarlo al suelo (González *et al.*, 2005).



## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Líneas base de contenido de Carbono

La línea base muestra un cuadro situacional y referencial de una problemática, con información cuantitativa y cualitativa de sus variables e indicadores, al momento del punto de partida de un proyecto alternativo (o complementario) con enfoque local, regional y global.

Las líneas base se entienden como un escenario virtual de carbono (C) contenido en los diferentes compartimentos del suelo y sirven como un punto de referencia para hacer un seguimiento (monitoreo) de la evolución de los indicadores estratégicos de la captura de C hacia los objetivos y metas previstos en el contexto de un proyecto futuro por PSA.

La información sobre la biomasa, es fundamental; para responder muchas preguntas sobre el papel que juegan los bosques en el fenómeno mundial, en captura de C incluyendo a los demás ciclos biogeoquímicos. Las estimaciones del flujo de C provenientes de los cambios de uso del suelo, son derivados de modelos cuyos resultados dependen, en parte, de estimaciones de biomasa en los bosques. Su importancia radica en generar escenarios de C almacenado en el suelo y en la vegetación, y que éste sea retenido como M.O., dando como resultado estimaciones del C neto absorbido, liberado por la combustión o descomposición.

Como los cambios de uso del suelo suceden, los modelos de cuantificación del C se dividen en la biomasa forestal de acuerdo al destino del carbono. Una parte se integra a la atmósfera, otra se almacena en el suelo, otra permanece en el sitio como materia muerta, o es exportado como productos. Por esto, la precisión de las estimaciones de biomasa es de crítica importancia, porque los modelos determinan la cantidad de C que llega a la atmósfera y son muy sensibles a estas estimaciones (Brown y Lugo, 1992).

Derivado de lo anterior, resulta importante conocer el contenido de C almacenado en biomasa aérea, ya que a partir de esto y de los incrementos, se estima la captura de carbono y que se considera un servicio ambiental como alternativa de manejo de los recursos naturales encaminado al desarrollo sustentable.



La línea base se puede establecer proyectando las tendencias pasadas y considerando la situación actual de los almacenes de carbono, para calcular así la cantidad de carbono almacenado o emitido con base en los patrones convencionales de uso del suelo y aprovechamiento de los bosques (Brown, 2002).

## 2.2. El sector forestal como sumidero de C

El C orgánico del suelo representa la mayor reserva en interacción con la atmósfera y se estima en cerca de 1 500 Peta-gramos (Pg)<sup>1</sup> a un metro de profundidad. El C inorgánico representa cerca de 1 700 Pg; sin embargo, éste es capturado en formas más estables, tales como el carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>). Por otra parte, la vegetación almacena aproximadamente 650 Pg y la atmósfera 750 Pg, cantidades considerablemente menores que las de los suelos y rocas (FAO, 2000).

El CO<sub>2</sub> es un agente fundamental en las reacciones geoquímicas y bioquímicas que constituyen el ciclo global del C (Isaza y Campos, 2007).

El C se acumula en compartimientos llamados depósitos y circula activamente entre ellos. Entre esos depósitos, los océanos son los que almacenan la mayor cantidad, 38.000 Gigatoneladas (Gt)<sup>2</sup>, seguido por el suelo, 1500 Gt, la atmósfera, 750 Gt y las plantas, 560 Gt (FAO, 2000).

Los ecosistemas forestales son el hábitat de una importante diversidad biológica; desarrollan funciones ambientales como la regulación del ciclo hidrológico, captura y almacenamiento de agua y carbono, además de generación y conservación de suelos, proporcionando numerosos bienes para las poblaciones humanas (CONAFOR, 2009).

El flujo neto terrestre de C es la diferencia entre la captura (sumideros) y las fuentes. Durante los años noventa del siglo XX, la biosfera terrestre (de la cual los bosques forman una gran parte) absorbió el C a una velocidad de aproximadamente 1,4 Gt por año, con lo que se estimó que los árboles y suelos forestales contienen 1,146 Gt de C.

---

<sup>1</sup> 1Pg = Peta gramo = 1,000,000,000,000,000 gramos.

<sup>2</sup> Gt = Giga tonelada = 1.000.000.000 de toneladas.



Los ecosistemas forestales funcionan a través de la interacción entre los ciclos biogeoquímicos, tanto del C, las sustancias nutritivas y el hidrológico. Estos ciclos varían como resultado de cambios medioambientales naturales que operan en dimensiones de siglos y milenios.

La superficie forestal estimada en la Tierra es de  $4.1 \times 10^9$  ha, donde las áreas naturales protegidas abarcan 2.3%, menos del 10% de las áreas que se encuentran bajo manejo. Aproximadamente 37% de C se encuentra en latitudes bajas ( $0^\circ$  a  $25^\circ$  lat.), 14% en las medias ( $25^\circ$  a  $50^\circ$  lat.) y 49% en las altas ( $50^\circ$  a  $75^\circ$  lat.). Es por esto que Dixon *et al.* (1994) afirman que la proporción de C capturado por la vegetación y suelo difiere en cuanto a su ubicación geográfica respecto de su latitud. Dos terceras partes del C en ecosistemas forestales se encuentra contenidas en el suelo.

Los biomas boreales circumpolares tienen una cobertura de  $2 \times 10^9$  ha en el hemisferio norte, y contienen 800 Gt de C reservado en la biomasa, detritus, suelo y turba. En los ecosistemas forestales boreales, la biomasa, detritus, turba (con 419 Gt C) y suelo (con 290 Gt C) contienen en su totalidad 709 Gt C (Apps *et al.*, 1993). Los bosques tropicales almacenan en la vegetación y el suelo 159 Gt C y 216 Gt C, respectivamente, para un total de 375 Gt C (Brown *et al.*, 1993).

Si bien las tasas de captura de C pueden variar considerablemente, los bosques naturales pueden ser considerados en equilibrio dinámico en relación al C bajo ciertas condiciones climáticas y para ciertas concentraciones atmosféricas de  $\text{CO}_2$ . De acuerdo a Wooster *et al.* (1998), el bosque prístino, en la Amazonía, es el ecosistema que contiene la mayor cantidad de C ( $305 \text{ Mg ha}^{-1}$ , de las cuales 28 % están en el suelo). Todos los cambios en el manejo de tales ecosistemas inducen variaciones importantes en la dinámica del C, dando lugar a menores existencias de este elemento que en el bosque original. Estas formas de manejo incluyen la agricultura de roza, tumba y quema, la deforestación, la forestación y la agrosilvicultura (Robert, 2002).

Actualmente la deforestación y la degradación forestal son factores importantes en el cambio climático global, puesto que producen emisiones netas de  $\text{CO}_2$ , además, generan grandes problemas locales y regionales, como el incremento de la erosión y el abatimiento de los mantos acuíferos, entre otros. Sin embargo, se ha estimado que, combinando estrategias de conservación forestal con proyectos de reforestación en todo el mundo, los



bosques podrían resultar en un sumidero neto de C durante los próximos cien años, permitiendo reducir de 20 a 50% de las emisiones netas de CO<sub>2</sub> a la atmósfera (IPCC, 1995).

Los temas sobre deforestación están considerados en el Artículo 3.4 y sobre la forestación en el Artículo 3.3 del Protocolo de Kioto.

De acuerdo a la Evaluación Global de los Recursos Forestales de la FAO, la tasa global actual de deforestación es cerca de 17 millones de hectáreas por año (FAO, 1993), alrededor de 0.45% de lo que resta del ecosistema forestal. La pérdida de C resultante, inmediato e importante, está parcialmente considerada en el 1.6 Gt de emisión del ciclo del C.

Aún si la parte superior de la biomasa fuera eliminada y quemada, entre 50 y 60% del C total del sistema que está sobre la superficie del suelo o en el suelo en forma de residuos, materia orgánica del suelo y raíces, puede ser manejada adecuadamente.

La dinámica del C en los ecosistemas forestales es muy compleja, por lo que, para hacer una estimación de los cambios en el almacenamiento de este, es necesario analizar la cantidad de C en los distintos componentes que integran los ecosistemas y las transferencias entre ellos en el tiempo y el espacio. Esto implica analizar conjuntamente la dinámica del C en: vegetación (aérea y subterránea), suelo (incluyendo materia en descomposición) y productos forestales.

### **2.3 México y sus ecosistemas forestales**

México posee una gran superficie de ecosistemas forestales con 55.3 millones de ha, ocupando el 11° lugar mundial, y genera una amplia gama de SA.

De estos ecosistemas, se pierden entre 500 y 800 mil hectáreas de superficie forestal anualmente; ocupando el 2° lugar en deforestación en América Latina y el 6° lugar a nivel mundial.

La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y la CONAFOR con el Inventario Nacional Forestal y de Suelos, realiza la zonificación forestal (Figura 1), para contribuir al desarrollo forestal sustentable.



Figura 1. Mapa de uso de suelo y zonificación forestal ( CONAFOR, 2013).

Bajo una adecuada política de apoyo, en el país el sector forestal tiene la capacidad de reducir el crecimiento de las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas por el sector energético, convirtiéndose en una de las opciones de mitigación más importantes a corto y mediano plazos.

Masera *et al.* (1995), estimaron que para el año 2030 México tendría un potencial de captura total de C dentro de un rango de 2.34 a 3.02 Gt para una superficie de 26.4 Mha en un escenario de política de apoyo, y de 4.18 a 5.12 Gt para una superficie de 39 Mha en un escenario de potencial tecnológico. Esto significa una captura anual de 67 a 116 Mt C año<sup>-1</sup>, que representa la mayor parte o el total de las emisiones actuales del sector energético e industrial en la República Mexicana.



## 2.4 Los bosques y su importancia en el ciclo de C

Los bosques son grandes generadores de vida vegetal y animal; además de los árboles, que destacan en todo el conjunto por alcanzar mayor altura y ser los componentes principales, existen otras series de plantas que se distribuyen formando estratos: arbustos leñosos, matorrales, plantas herbáceas; y al ras del suelo, ocupando zonas de mayor umbría, musgos, líquenes y hongos. Según el bosque que se trate, cada uno de estos estratos puede tener mayor o menor importancia o incluso faltar alguno de ellos (Bravo, 1998).

La vegetación del bosque tiene la capacidad de crear un microclima, diferente del que hay en terreno descubierto. El bosque influye sobre la incidencia de los rayos solares, las precipitaciones, la humedad de la atmósfera, la temperatura, el viento y la evapotranspiración.

El papel modificador que tienen las formaciones forestales varía con las especies que las constituyen, su altura, estructura y densidad.

Los bosques captan y mantienen la calidad de agua, infiltrándose en sus suelos y alimentando los mantos freáticos, regulan el caudal de los ríos, y reducen la erosión y la sedimentación en zonas con menor inclinación; también actúan como esponjas, capaces de almacenar grandes cantidades de agua de lluvia al absorber cuatro veces más que los suelos cubiertos por pastos y 18 veces más que el suelo desnudo.

En el año 2000, aproximadamente 30% (3869 Mha<sup>3</sup>) de la superficie terrestre del mundo estuvo cubierto de bosques. Casi la mitad de las superficies boscosas se encuentran en los trópicos, una tercera parte está en la zona boreal, y 10% aproximadamente se halla igualmente en las regiones forestales subtropicales y templadas (Percy *et al.*, 2003).

La proporción de la superficie terrestre del mundo cubierta de bosque ha cambiado a causa de actividades antropogénicas. Por ejemplo, durante la década entre 1990 y 2000, el área forestal en los trópicos disminuyó 14.2 Mha por año sobre todo debido a la deforestación. Al mismo tiempo, la superficie boscosa aumentó 1.7 Mha por año en bosques no tropicales sobre todo debido a la expansión natural (Percy *et al.*, 2003).

---

<sup>3</sup>Mha = Mega hectárea = 1.000.000 hectáreas



Según la FAO, la superficie forestal mundial incluyendo los bosques plantados abarca alrededor de 4,000 millones de hectáreas, que cubren 31% de la superficie global. América Latina y el Caribe albergan 22% de los bosques del mundo, con un área de 860 millones de hectáreas aproximadamente. De éstas, 831.5 millones de hectáreas se encuentran en América del Sur (97%), 22.4 millones en América Central y 5.9 millones en el Caribe como se muestra en la Figura 2 (FAO, 2009).

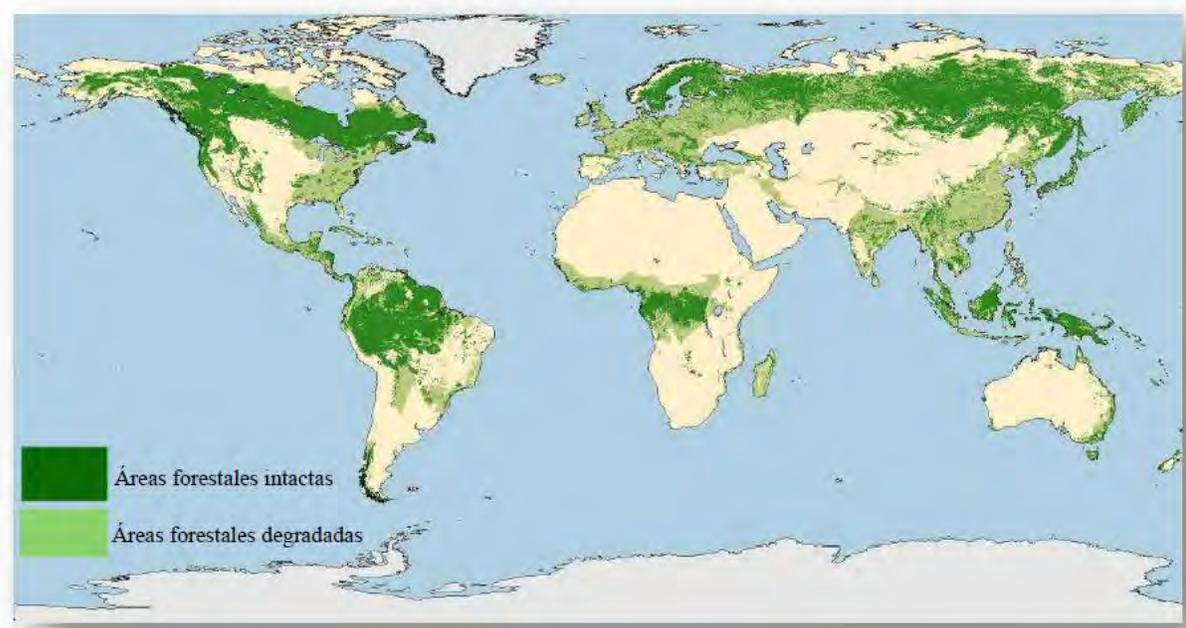


Figura 2. Principales áreas forestales degradadas e intactas del planeta (Greenpeace y Centro de Conservación de la Biodiversidad y Unión Socio ecológica Internacional).

Los bosques desempeñan un papel importante en el ciclo de C a nivel mundial dado que han absorbido casi la tercera parte de las recientes emisiones antropogénicas de CO<sub>2</sub> a la atmósfera (Percy *et al.*, 2003).

Estimaciones realizadas sostienen que los bosques del mundo almacenan 289 Gt de C solo en su biomasa, de estas, alrededor de 100 Gt están almacenadas en los bosques de América del Sur. Si bien el manejo forestal sostenible (MFS) y la rehabilitación de los bosques permiten conservar o aumentar las existencias forestales de C, deforestación, degradación y escasa ordenación forestal las reducen (FAO, 2010).



## 2.5 Régimen de propiedad de los bosques de México

En México 70% de los bosques es propiedad ejidal o comunal (Acosta y Etchevers, 2005). Según la Ley Federal de Reforma Agraria, un ejido es la porción de tierra, bosque o agua que el gobierno entregó a un núcleo de población campesina para su explotación.

Tomando en cuenta el artículo 52 del capítulo I sobre la propiedad de los bienes ejidales y comunales, dice que, se aplicará la ley a los bienes que pertenecen a los núcleos de población que de hecho o por derecho guarden el estado comunal (Ley Federal de la Reforma Agraria, 1983).

## 2.6 Ecosistemas ribereños como sumideros de C

Ruiz (2011) reportó que se considera como sumidero a cualquier proceso, actividad o mecanismo que absorbe un Gas de Efecto Invernadero (GEI), un aerosol o un precursor de GEI de la atmósfera, como los océanos, los bosques y de estos últimos sus ecosistemas, suelos y zonas ribereñas (Figura 3).

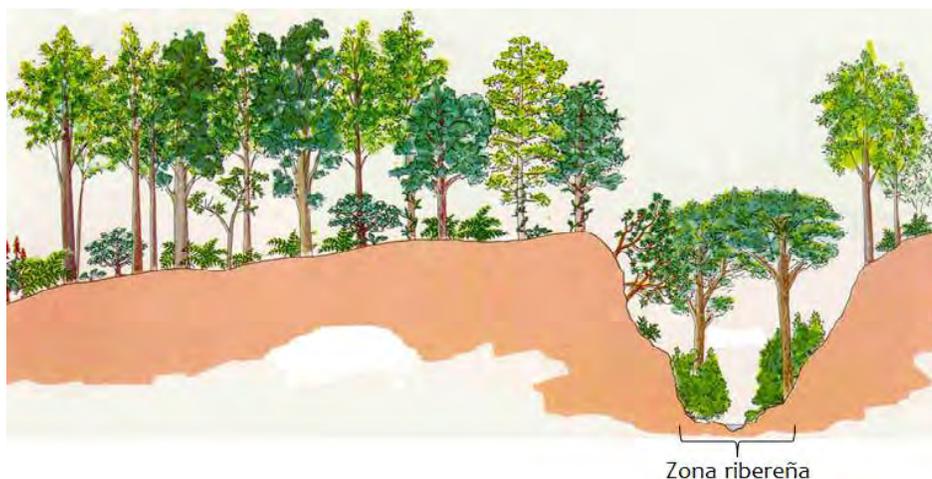


Figura 3. Representación de una zona ribereña.

Se designan con el nombre de zonas ribereñas a las regiones de transición y de interacciones entre los medios terrestres y acuáticos, se caracterizan por una flora y una fauna cuya composición está fuertemente determinada por la intensidad luminosa, el contenido de agua y la granulometría del suelo. Las zonas de transición entre el medio terrestre y los ecosistemas acuáticos poseen un poder tampón, es decir tienen la capacidad de absorber y almacenar elementos, por ejemplo retienen parte del N y P transportados por la escorrentía, desde los cultivos hasta los cursos de agua (Morales y Fernández, 2006).



Además de la retención de elementos, las bandas de vegetación de ribera sombrean el agua y reducen su temperatura durante los días calurosos, estabilizan las orillas, reducen los riesgos de erosión y ofrecen un hábitat a muchas especies vegetales y animales (Bren, 1993).

Los ríos que atraviesan los bosques están rodeados por vegetación riparia<sup>4</sup>, que controla la temperatura y la luminosidad del agua, aumenta la estabilidad de las orillas y proporciona cantidades de detritos vegetales (madera muerta y hojas muertas) los cuales reducen la velocidad de la corriente, frenan las crecidas y crean zonas de calma, favorables a la instalación de muchas especies animales (Morales y Fernández, 2006).

Los suelos ribereños son excepcionalmente fértiles y productivos, estos suelos demuestran ser ricos en nutrientes, debido a que siempre que una corriente de agua escapa de sus bancos, deja un depósito de sedimentos tras de sí y, con el tiempo, se crea un rico suelo aluvial, la clase de suelo que hace populares a los valles de los ríos entre los campesinos, el agua que fluye sobre estos suelos facilita el reciclamiento de los nutrientes y, así, el desarrollo de las plantas mediante el movimiento de O<sub>2</sub> a través del suelo y la remoción del CO<sub>2</sub>, así como de los productos metabólicos residuales (Sethuram *et al.*, 2007).

Al ser los bosques de ribera comunidades vegetales exuberantes en relación con su entorno, caracterizadas por su mayor altura, densidad, cantidad de biomasa, complejidad estructural y número de especies siempre verdes (Bren, 1993), la estimación del contenido de C constituye uno de los objetivos centrales para la investigación; por lo que es posible incrementar la captura de C en este tipo de ecosistemas forestales conocidos como sumideros. En efecto, los contingentes como el suelo o la biomasa forestal tienden a capturar y liberar a la atmósfera determinadas cantidades de C (línea base), y cuando se establece un sistema de manejo para el reservorio, es posible incrementar el contenido de dicho elemento, es decir, secuestrar parte del C contenido en la atmósfera (Sethuram *et al.*, 2007).

---

<sup>4</sup> Vegetación riparia: especies vegetales con fuerte asociación a las zonas ribereñas.



## 2.7 Flujos de CO<sub>2</sub> y captura unitaria en ecosistemas forestales ribereños

El CO<sub>2</sub> atmosférico es incorporado a los procesos metabólicos de las plantas mediante la fotosíntesis y participa en la composición de todas las estructuras necesarias para que la vegetación pueda desarrollarse (follaje, ramas, raíces y tronco). Al crecer, se incrementa el follaje, ramas, flores, frutos y yemas de crecimiento así como su altura y grosor del tronco en el caso de árboles.

Durante el tiempo en que el CO<sub>2</sub> se encuentra constituyendo alguna estructura del árbol y hasta que es enviado nuevamente al suelo o a la atmósfera, se considera almacenado. En el momento de su liberación (ya sea por la descomposición de la materia orgánica (MOS) y/o por la quema de la biomasa) el CO<sub>2</sub> fluye para regresar al ciclo del C (Ordoñez, 1999).

La figura 4, representa los flujos y almacenes de C en un ecosistema forestal, donde el follaje, ramas, raíces, tronco, desechos, productos y humus estable, son almacenes de C, que se reincorporarán al ciclo por descomposición y/o quema de la biomasa forestal.

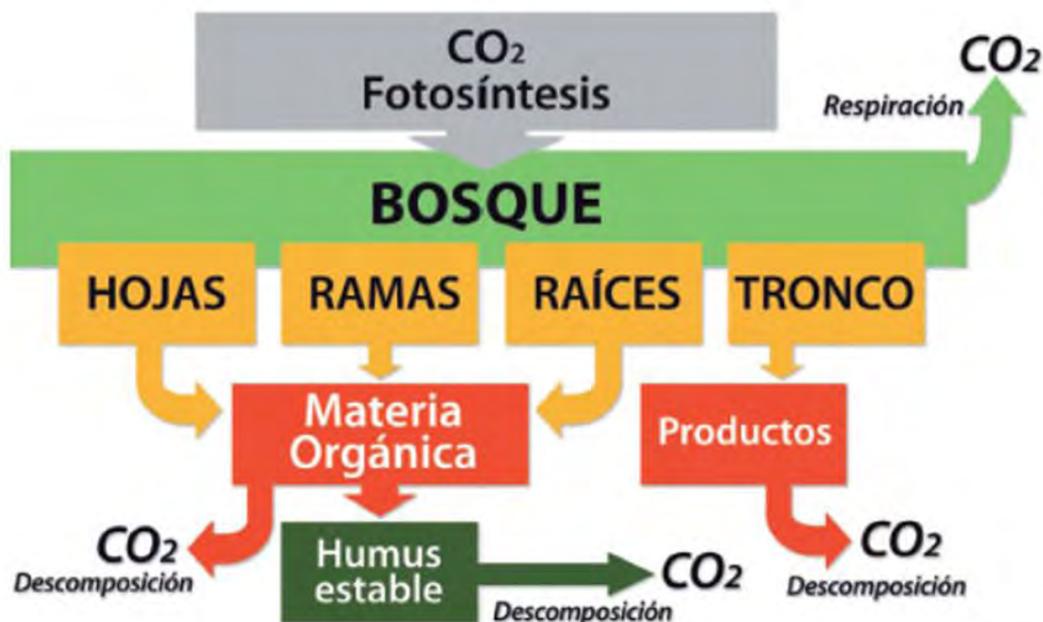


Figura 4. Flujos y almacenes de C en un ecosistema forestal (Ordoñez, 1999).



Para definir la captura unitaria se estima el C contenido en diferentes almacenes (que pueden ser emitidos o ahorrados, según Masera, 1995). Estos almacenes incluyen:

- $C_v$  = carbono contenido en vegetación
- $C_d$  = carbono contenido en la materia orgánica en descomposición
- $C_s$  = carbono contenido en suelos
- $C_p$  = carbono contenido en productos forestales (muebles, papel)
- $C_f$  = carbono ahorrado por no utilizar combustibles fósiles (proyectos bioenergéticos).

## 2.8 Dinámicas del C orgánico en el suelo y la vegetación

El suelo es un cuerpo natural de la superficie terrestre que tiene propiedades debidas al efecto integral del clima y la materia viviente como plantas y animales, los cuales actúan sobre el material de origen condicionado por el relieve durante periodos de tiempo (Foth y Turk, 1984).

Éste es un sistema trifásico, en donde la fase sólida está representada por material mineral y orgánico, la fase líquida por agua, la cual contiene sustancias minerales y gases disueltos como el oxígeno ( $O_2$ ) y bióxido de carbono ( $CO_2$ ) en disolución, mientras que, la fase gaseosa está constituida por una mezcla de gases; El volumen ocupado por cada uno de estos en un suelo superficial deseable, con condiciones ideales para el crecimiento de las plantas, sería aproximadamente 45% de material mineral, 5% de MOS, 25% de agua y 25% de aire (Foth y Turk, 1980 y Sepúlveda *et. al.*, 2005).

El suelo es el medio donde se desarrolla la vida de innumerables formas de plantas y animales que varían en tamaño desde las que necesitan verse en el microscopio (micro fauna), como hongos, bacterias y nemátodos, a los macro organismos como los insectos y lombrices (Figura 5), que son muy importantes, ya que mejoran las condiciones del suelo acelerando la descomposición y mineralización de la MOS (Margalef, 1992).



Así como los ecólogos marinos consideran que una mayor diversidad de organismos acuáticos es indicativa de agua de buena calidad, los científicos de suelos usan el concepto de diversidad biológica como un indicador de la calidad del suelo (Margalef, 1992).

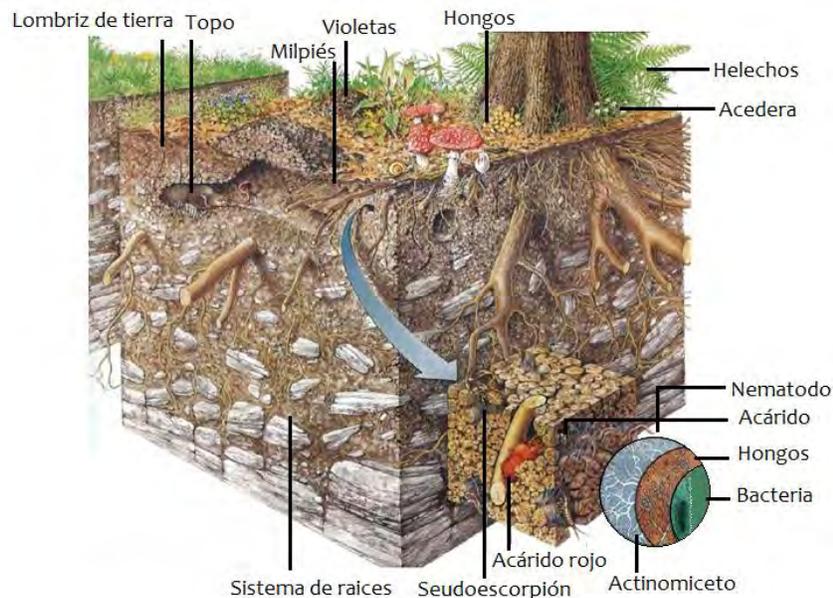


Figura 5. Variedad de organismos que viven y constituyen importantes flujos de transformación en el suelo (Margalef, 1992).

Los organismos y las interacciones entre ellos estructuran la red alimenticia del suelo. La energía necesaria para todas las redes alimenticias es generada por los productores primarios: plantas, líquenes, musgos, bacterias fotosintéticas y algas que usan la luz del sol para transformar el  $\text{CO}_2$  de la atmósfera en carbohidratos. La mayor parte de los organismos que dependen de los productores primarios para obtener su energía y nutrimentos: son los llamados consumidores.

Según Jackson, 1993; La descomposición de la MOS y la liberación del C son procesos aeróbicos, lo que significa que los microorganismos necesitan  $\text{O}_2$  y, por lo tanto:

- Los residuos sobre la superficie del suelo generan un ciclo del C más lento debido a que están expuestos a menor actividad de los microorganismos y entonces esta decae más lentamente dando lugar a la producción de humus que es más estable y libera menos  $\text{CO}_2$  a la atmósfera.



- Cuando se remueven los residuos son incorporados en el suelo junto con el aire y se ponen en contacto con muchos microorganismos lo cual acelera el ciclo del C. La descomposición es más rápida, lo que trae como resultado menos formación de humus estable y liberación del CO<sub>2</sub> a la atmósfera y, por lo tanto, una reducción de la MOS.

La vegetación constituye el principal factor de vida en la tierra pues es el mayor transformador de sustancias que existe y es el principal elemento de la cadena alimentaria del planeta; sin vegetación no puede existir otro tipo de vida sobre la tierra y ésta depende del agua, el suelo y la atmósfera. El agua constituye más de 70% de las plantas, el suelo le sirve de sustento y proveedor de nutrimentos y la atmósfera controla en suministro de agua, energía, O<sub>2</sub>, N y CO<sub>2</sub> (Linderman, 1994).

Las plantas juegan el papel de productores primarios, porque son capaces de usar en forma directa al agua, energía solar y CO<sub>2</sub> de la atmósfera, para crear moléculas orgánicas y tejidos vivos, también estabiliza los suelos, reduce las amenazas de la erosión y los deslizamientos que podrían resultar en contaminación y sedimentación de cuerpos de agua (Linderman, 1994).

Las raíces de las plantas y las algas representan la flora en el suelo. Las plantas y las algas son los productores primarios que a través de la fotosíntesis, con la energía del sol, convierten el CO<sub>2</sub> del aire y el agua del aire y el suelo en carbohidratos disponibles para otros organismos (Linderman, 1994).

## **2.9 Materia orgánica y procesos de transformación del C en el suelo**

Dentro de las interacciones que realizan el suelo con la vegetación, está la descomposición de la MOS, que proviene de las raíces, residuos de plantas y organismos vivos o muertos del suelo. En forma general, se ha indicado que los suelos minerales contienen menos de 20% de MOS, mientras que los suelos orgánicos (turberas y mucks) contienen más de 20% de MOS. Sin embargo, una diferenciación más específica debe considerar al contenido de arcilla (Ortiz, 2010).

Según Pape y Legger, 1994; la acumulación de la MOS es favorecida en áreas de precipitación abundante o drenaje deficiente, baja temperatura y vegetación nativa de



pastos. La proporción en que se descompone la MOS es la clave de su acumulación en el suelo. Por ejemplo, los suelos de tundra acumulan una capa de materia orgánica, aunque la producción vegetal sea mínima, debido a que el proceso de descomposición es lento por efecto de una baja temperatura, como se muestra en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Relación entre el ciclo de la MOS, la clase de drenaje y clima.

<b>Clase de Drenaje del suelo</b>	<b>Clima</b>	<b>Producción de Materia orgánica</b>	<b>Descomposición de materia orgánica</b>
<b>Bien Drenado</b>	Templado seco	Baja	Muy lenta
<b>Bien Drenado</b>	Tropical seco	Baja	Lenta
<b>Bien Drenado</b>	Templado húmedo	Alta	Rápida
<b>Bien Drenado</b>	Tropical húmedo	Muy alta	Muy rápida
<b>Pobrementemente Drenado</b>	Templado húmedo	Baja	Muy lenta
<b>Pobrementemente Drenado</b>	Tropical húmedo	Alta	Lenta

La tasa de descomposición indica la tasa de renovación o rapidez con que la hojarasca recién caída se transforma física y químicamente para incorporarse al suelo. Esta incorporación del material foliar puede realizarse en forma orgánica o inorgánica.

La descomposición de la MOS la lleva a cabo la biomasa microbiana, microorganismos del suelo que juegan un papel central en la retención y liberación de nutrimentos en ecosistemas naturales, siendo al mismo tiempo una fuente y sumidero de éstos. La relación de éstos con las plantas puede ser tanto de mutualismo como de competencia (Harte y Kinzig, 1993).

La cantidad de biomasa microbiana varía a lo largo del año, siendo esta dinámica temporal muy importante en el grado de liberación o inmovilización de nutrimentos en el medio, y por lo tanto en su disponibilidad para otros organismos (Bauthus y Barthel, 1995; Díaz-Ravina *et al.*, 1995). El crecimiento de la biomasa microbiana se ve influenciado por factores tales como la humedad, temperatura, aireación, cantidad y naturaleza del C orgánico en el medio o el pH del suelo, existiendo distintos óptimos en función del tipo de microorganismos (Vitousek, 1997; Cochran *et al.*, 1989; Tietema y Wessel, 1992; Wardle, 1998).

En la Figura 6 se esquematiza la dinámica del C orgánico presente en los suelos naturales, representando un balance entre la absorción de material vegetal muerto y la liberación por descomposición (mineralización).

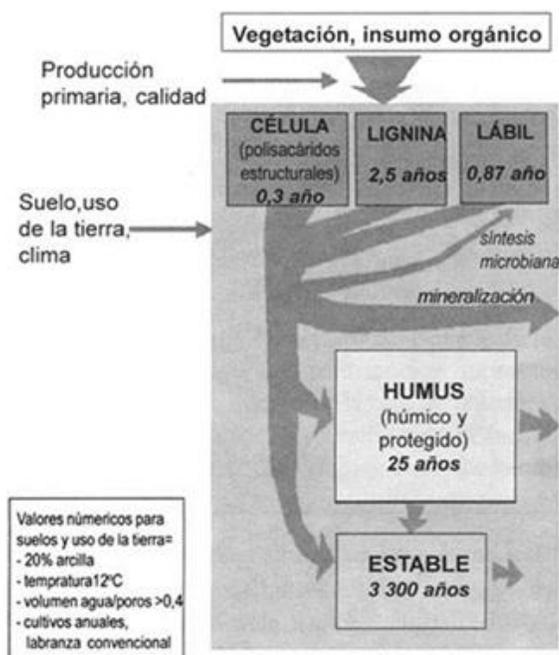


Figura 6. Dinámica del C orgánico en el suelo (FAO, 2000).

El Carbono Orgánico del Suelo (COS) es un componente importante del ciclo global del C, ocupa 69,8 % del C orgánico de la biosfera (FAO, 2001). El suelo puede actuar como fuente o reservorio de C dependiendo de su uso y manejo (Lal *et al.*, 1990, Lal, 1997). Se estima que conforme se incorporan nuevos suelos a la agricultura hasta establecer sistemas intensivos de cultivo se producen pérdidas de COS que fluctúan entre 30 y 50% del nivel inicial (Reicosky, 2002).

La pérdida de material húmico de los suelos cultivados es superior a la tasa de formación de humus de suelos no perturbados por lo que el suelo, bajo condiciones de cultivo convencionales, es una fuente de CO<sub>2</sub> para la atmósfera (Kern y Johnson, 1993, Gifford, 1994, y Reicosky, 2002).

### 2.10 Captura de C, una opción para mitigar el Cambio Climático

El cambio climático global es consecuencia de procesos de cambio y transformación en los sistemas naturales. Estas alteraciones han sido continuas desde la conformación de la tierra, pero han sufrido una aceleración, y en algunos casos, modificaciones en los últimos doscientos años debido a la intervención humana (Ludevid, 1997).



La concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera se ha elevado 30 % desde 1860 de 280 a 360 ppm, esto significa un incremento de 31 % en poco más de 100 años. Aunque se han documentado concentraciones similares en el registro geológico, ésta constituye el nivel más alto alcanzado en los últimos 420, 000 años, y la velocidad de cambio no parece tener precedente en los últimos 20,000 años (IPCC, 2001).

De acuerdo con la evidencia disponible actualmente, es poco probable que la temperatura media global haya variado más de 1° C en un siglo en el transcurso de este periodo. Gracias a estudios realizados en núcleos de hielo, se ha establecido una sólida correlación entre el contenido de CO<sub>2</sub> en la atmósfera y la temperatura terrestre (Figura 7). En ésta, altas concentraciones atmosféricas de este gas coinciden con incrementos en la temperatura media global (Estrada, 2001).

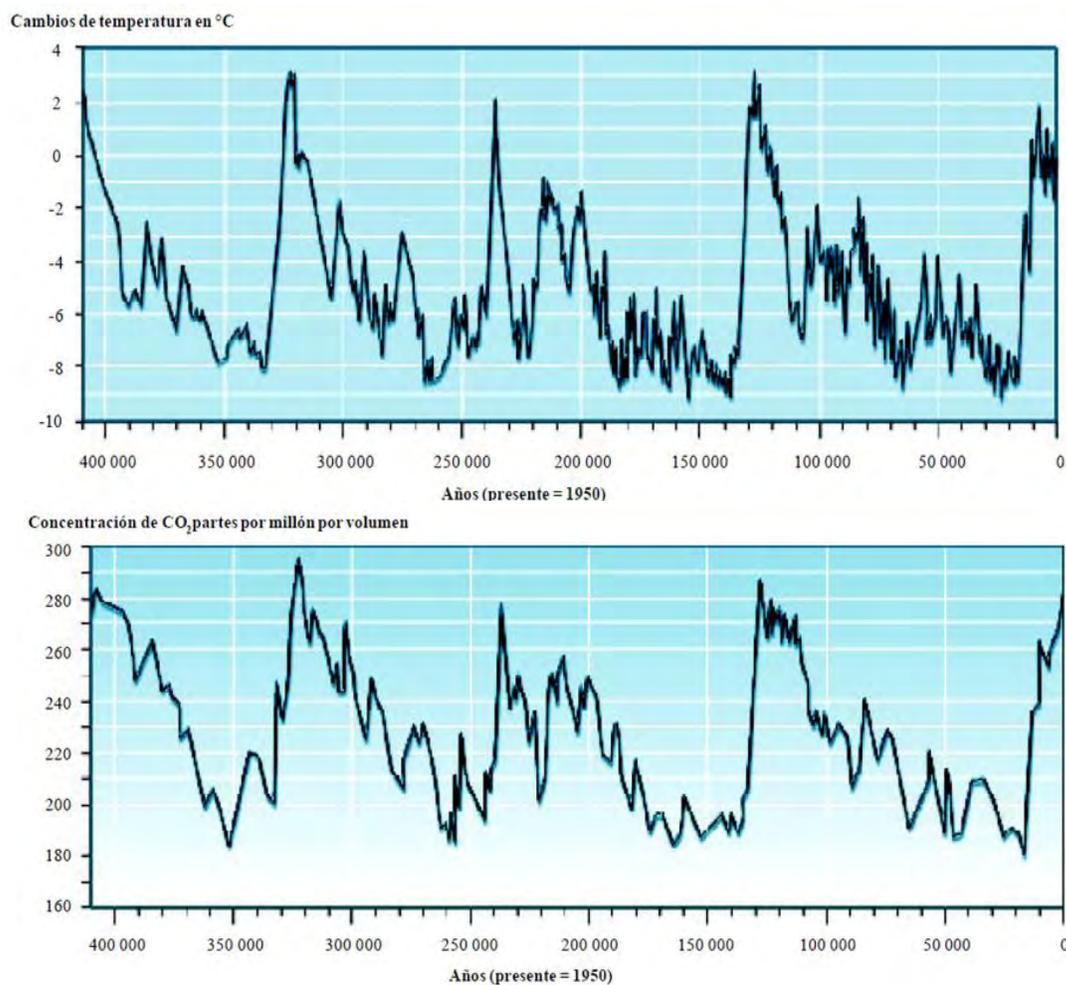


Figura 7. Temperatura y concentración del CO<sub>2</sub> en la atmósfera durante los últimos 400 000 años, del núcleo de hielo de Vostok (Estrada, 2001).



Las emisiones de C provenientes de la combustión y transformación del petróleo, el carbón y gas natural, con grandes reservas aún por consumir son los factores más importantes para provocar cambios climáticos notables. Estas emisiones suponen casi 80% del total, mientras que el resto correspondería a la deforestación y al cambio de uso de suelo: los árboles que como sabemos absorben este gas cuando están vivos, lo desprenden al ser talados y quemados (Ludevid, 1997).

Los bosques se han convertido en un importante componente de las negociaciones internacionales sobre cambios climáticos, debido a su habilidad para absorber CO<sub>2</sub> de la atmósfera, y convertirlo en madera y otros tejidos de biomasa. En el periodo comprendido de 1980 a 1995, y sólo en los países tropicales, se han perdido en promedio 13 millones de hectáreas de bosques por año, durante los últimos 15 años. La deforestación en el trópico impide la captura de aproximadamente 1,400 millones de toneladas de C por año contenidas en la atmósfera, equivalente a 20% de las emisiones globales.

El protocolo de Kyoto introdujo varios mecanismos económicos para un Desarrollo Limpio que permite a los países industrializados conseguir parte de sus objetivos de reducción invirtiendo en proyectos de ahorro de emisiones en países en vías de desarrollo; dicho mecanismo es el llamado bono verde de C (Comunidades europeas, 2009).

Las emisiones de GEI por actividades antropogénicas en México se han elevado en los últimos años debido a la pérdida de cubierta vegetal o cambio de uso de suelo, éstas comprenden prácticamente desde la producción de alimento y otras mercancías, el transporte de éstas y de personas, la generación de energía para realizar tales actividades, la disposición de los desechos urbanos e industriales, etc.

Resulta de vital importancia que se generen políticas y leyes ambientales con la participación activa de la comunidad científica y social para mitigar las emisiones de CO<sub>2</sub> y otros GEI.

Masera *et al.*, (1995) define las opciones de mitigación que induce el carbono (CO<sub>2</sub>) como: cualquier acción que da como resultado una reducción del incremento neto en las emisiones de este gas de un área determinada y/o por la sustitución de combustibles fósiles. Asimismo, identifica dos opciones básicas de mitigación de C en el sector forestal:



a) Conservación, que consiste en evitar las emisiones de C preservando las áreas naturales protegidas, fomentando el manejo sostenible de bosques naturales y el uso renovable de la leña, y mediante la reducción de incendios.

b) Reforestación y forestación, dedicadas a recuperar áreas degradadas mediante acciones como la protección de cuencas, la reforestación urbana, la restauración para fines de subsistencia (leña), el desarrollo de plantaciones comerciales para madera, pulpa para papel, hule, etc., así como de las plantaciones energéticas (producción de leña y generación de electricidad) y de los sistemas agroforestales.

El Protocolo de Kioto reconoce que las emisiones netas de C pueden ser reducidas ya sea disminuyendo la tasa a la cual se emiten a la atmósfera los GEI o incrementando la tasa por la cual esos gases son retirados de la atmósfera gracias a los sumideros. Los suelos agrícolas están entre los mayores depósitos de C del planeta y tienen potencial para expandir el secuestro del mismo y de esta manera mitigar la creciente concentración atmosférica de CO<sub>2</sub>. Dentro del contexto del Protocolo de Kioto y las subsiguientes discusiones de la Conferencia de las Partes (COP), hay un cierto número de características que hacen que el secuestro de C en las tierras agrícolas y forestales pueda ofrecer posibilidades de estrategias atractivas de modo de mitigar el incremento en la atmósfera de las concentraciones de GEI (Robert, 2002).

El Artículo 3.4 del protocolo de Kioto considera aprobar la expansión de los sumideros creados por la intervención humana. Los recientes acuerdos post-Kioto consideran los sumideros en los países y reconocen el potencial fundamental de la agricultura, de las tierras de pastoreo y de los suelos forestales para capturar carbono y la necesidad de conceder créditos nacionales para favorecer la formación de sumideros de C en los suelos agrícolas (Robert, 2002).

El valor del bosque como fijador y almacenador de C es conocido, aunque su conceptualización como un SA solo ha aparecido cuando la conciencia del papel de las emisiones de CO<sub>2</sub> en el cambio climático ha propiciado la firma de acuerdos internacionales y a la ejecución de políticas tendentes a reducir dichas emisiones (Ruiz, 2007).



Estimar con precisión la dinámica de los flujos netos de C entre los bosques y la atmósfera (es decir, el balance emisión-captura) es uno de los problemas abiertos más importantes en la discusión sobre cambio climático (IPCC, 1995; Dixon *et al.*, 1994).

### **2.11. Servicios Ambientales (SA) en México**

México contribuye aproximadamente con 2% de las emisiones mundiales de GEI, representando el decimotercer país que emite más CO<sub>2</sub> a la atmósfera del planeta por quema de combustibles fósiles (Maserá *et al.*, 1997).

Como un país exportador de petróleo, México depende fuertemente de los combustibles fósiles para satisfacer sus necesidades energéticas. Cerca de 96% de la energía primaria proviene de los hidrocarburos. México tiene 49 millones de hectáreas de bosques naturales; además 21 millones clasificadas como tierras forestales degradadas. La deforestación y la degradación de los bosques en el país han sido muy graves en las últimas dos décadas con una pérdida estimada de 670,000 ha por año a principios de los noventa (Maserá *et al.*, 1997). Aproximadamente se emiten cada año, 191 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> (52 millones de toneladas de C) por deforestación (Maserá *et al.*, 1997).

En la actualidad varias actividades en el país cuyos objetivos son atender las prioridades nacionales de desarrollo, simultáneamente ayudan a reducir la tasa actual de crecimiento de las emisiones de GEI. Estas actividades incluyen, dentro del sector energético, mejoras en la eficiencia energética del sector industrial, transporte, comercial y residencial; cambio a combustibles menos intensivos en la emisión de C y la creación de estándares para nuevos equipos. Dentro del sector forestal, la adecuada conservación y manejo de los bosques naturales, las alternativas para disminuir la deforestación, así como la reforestación de las tierras degradadas y deforestadas y el fomento de los sistemas agroforestales son también acciones que al cumplir prioridades de conservación forestal, también ayudan a mitigar las emisiones de GEI.

Una de estas acciones para mitigar las emisiones de GEI y reducir los efectos del cambio climático global son los SA; estos conforman aquellos bienes y servicios que favorecen una trayectoria eco-eficiente de los procesos productivos, tanto aquellos productos y tecnologías que conllevan un menor consumo de recursos naturales y/o la reducción de impactos y riesgos ambientales (Muñoz, 2005).



De acuerdo a la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable (Última reforma DOF 23-04-2012) del artículo 7°, fracción XXXVII de la legislación mexicana, los Servicios Ambientales se definen como: 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 C, de contaminantes y componentes naturales; la generación de O<sub>2</sub>; el amortiguamiento del impacto de los fenómenos naturales; la modulación o regulación climática; la protección de la biodiversidad, de los ecosistemas y formas de vida; la protección y recuperación de suelos; el paisaje y la recreación, entre otros.

De acuerdo a la Ley General de Aguas Nacionales (Última Reforma DOF 20-06-2011) del artículo 3°, fracción XLIX de la legislación mexicana se conoce como Servicios Ambientales: Los beneficios de interés social que se generan o se derivan de las cuencas hidrológicas y sus componentes, tales como regulación climática, conservación de los ciclos hidrológicos, control de la erosión, control de inundaciones, recarga de acuíferos, mantenimiento de escurrimientos en calidad y cantidad, formación de suelo, captura de C, purificación de cuerpos de agua, así como conservación y protección de la biodiversidad; para la aplicación de este concepto en esta Ley se consideran primordialmente los recursos hídricos y su vínculo con los forestales.

De acuerdo a la Ley General de Vida Silvestre (Última Reforma DOF 20-06-2011) del artículo 3°, fracción XLII de la legislación mexicana se entiende por Servicios Ambientales: Los beneficios de interés social que se derivan de la vida silvestre y su hábitat, tales como la regulación climática, la conservación de los ciclos hidrológicos, la fijación de N, la formación de suelo, la captura de C, el control de la erosión, la polinización de plantas, el control biológico de plagas o la degradación de desechos orgánicos.

De acuerdo a la Ley Ambiental del Distrito Federal en su artículo 5 se entenderá por Servicios Ambientales: Aquellos derivados de los ecosistemas o sus elementos, cuyos valores o beneficios son económicos, ecológicos, o socioculturales y que inciden directamente en la protección y mejoramiento del medio ambiente, propiciando una mejor calidad de vida de los habitantes y que justifican la necesidad de desarrollar acciones para



promover la conservación, recuperación y uso racional de aquellos elementos relevantes para la generación de estos servicios en beneficio de las generaciones presentes y futuras.

Los Bienes y Servicios Ambientales (B y SA) constituyen un importante elemento de soporte para la política ambiental. Si bien es cierto que las medidas para la efectiva protección del medio ambiente y el uso sustentable de los recursos naturales requieren mucho más que soluciones tecnológicas e infraestructura física, particularmente en países con altos niveles de heterogeneidad y complejidad socioeconómica, como en el caso de México, es indudable su contribución en el diagnóstico y monitoreo del estado que guardan los ecosistemas y de las afectaciones de la contaminación; en la prevención y atención desastres naturales; en la planeación, instrumentación y verificación de una serie de disposiciones establecidas para el cuidado ambiental; en la reducción de los impactos y riesgos al medio ambiente y en el incremento de la tasa de eficiencia en el uso de los recursos naturales (Muñoz, 2005), precisamente estas dos últimas características, confieren a los SA un significado económico, en el sentido de contribución directa al mantenimiento del capital natural.

En tanto actividad económica, los SA generan, de manera directa o indirecta, un número significativo de fuentes de empleo y una amplia gama de satisfactores. Su contribución a la economía, en términos de valor agregado, es relativamente modesta, pero cada vez mayor (Muñoz, 2005).

En las últimas tres o cuatro décadas, en respuesta a preocupaciones por el notable agravamiento del deterioro ambiental y al desarrollo, en muchos países, de una política y una regulación ambientales, que enfatizaron fundamentalmente el establecimiento de límites máximos de emisiones, medidas varias para el control de la contaminación y el saneamiento de sitios contaminados, en los casos en que esto es factible. Ello ha dado lugar al universo de lo que se denominan “B y SA de segunda generación”, mismos que conforman, hasta la fecha, la mayor parte del mercado (Muñoz, 2005).

Más recientemente, se ha empezado a dar un crecimiento de SA orientados a minimizar y prevenir daños y riesgos al medio ambiente, así como a apoyar el uso sustentable de los recursos naturales. Este desarrollo tiene que ver con el giro observado desde hace algunos años en la política ambiental de algunos países, principalmente industrializados, muchos de los cuales además son los más importantes oferentes de SA.



Tiene que ver también con las tendencias que muestra la economía en su conjunto de una mayor vinculación entre eficiencia económica, posicionamiento de mediano plazo en el mercado, desempeño ambiental y responsabilidad social (Muñoz, 2005).

## **2.12 Pago por Servicios Ambientales (PSA) en México**

El concepto de pago por servicios ambientales (PSA) está entre los enfoques que promueven más directamente la conservación (Hardner y Rice 2002, Niesten y Rice 2004). A medida que los hábitats naturales y silvestres van disminuyendo, los servicios ambientales (SA) antes ofrecidos de manera gratuita por la Naturaleza se ven cada vez más amenazados. Esta creciente escasez los vuelve sujetos potenciales de comercialización. La idea central del PSA es que los beneficiarios externos de los SA paguen de manera directa, contractual y condicionada a los propietarios y usuarios locales por adoptar prácticas que aseguren la conservación y restauración de ecosistemas (Wunder, 2006).

Si bien en varias economías desarrolladas existen esquemas de PSA, en los países en desarrollo han sido poco probados. Hay muchas iniciativas incipientes (Landell-Mills y Porras 2002), pero pocas experiencias reales en las que el dinero realmente cambie de manos de manera condicionada.

Actualmente, se destacan cuatro tipos de SA:

1. Secuestro y almacenamiento de C.
2. Protección de la biodiversidad.
3. Protección de cuencas hidrográficas.
4. Belleza escénica.

Uno de los SA de los cuales se hace más frecuentemente uso es el sector forestal y sus bosques, por la creciente demanda de maderas, uso de suelo, producción de alimentos etc., pero estos funcionan como sumideros de C, siendo el CO<sub>2</sub> el gas que más contribuye al calentamiento global. Una forma de mitigar sus efectos es el almacenamiento en su biomasa mediante la fotosíntesis y en el suelo a través de la acumulación de MOS (Ávila *et al.*, 2001).



Un aspecto esencial para poder implementar las diferentes opciones de mitigación forestal es determinar sus costos económicos en términos de los denominados “costos de captura de carbono” (Maserá *et al.*, 2000), es decir los costos por unidad de C capturado.

En México, el organismo responsable de la operación y la política forestal, es la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), destinada a impulsar las actividades productivas, la conservación y restauración de los bosques, selvas y vegetación de zonas áridas y semiáridas del país.

La CONAFOR, a través del programa Pro Árbol, el más importante del sector forestal, otorga incentivos a los propietarios de los terrenos forestales, para implementar distintos conceptos de apoyo, como es el caso de PSA del Bosque (SEMARNAT, 2006).

El PSA fue diseñado para proveer incentivos económicos a los dueños de terrenos forestales (ejidos, comunidades y pequeños propietarios) para apoyar las prácticas de conservación y evitar el cambio de uso del suelo (deforestación) de los bosques. PSA pretende crear capacidades para desarrollar mercados de SA en México (SEMARNAT, 2006).

En el 2003 la CONAFOR implementa el Programa de Servicios Ambientales Hidrológicos (PSAH), financiado con una parte de las cuotas del agua cobradas al amparo de la Ley Federal de Derechos (LFD). Los pagos fueron dirigidos a la preservación del bosque templado y tropical (en detalle, bosques mesófilos) asociado con el abastecimiento de agua a las comunidades.

En 2004, se crea el Programa para el Desarrollo de los Mercados de Servicios Ambientales de Captura de Carbono y los Derivados de la Biodiversidad y para Fomentar el Establecimiento y Mejoramiento de los Sistemas Agroforestales (PSA-CABSA).

Desde 2006, el programa PSA recibe asistencia técnica y financiera del Banco Mundial y el GEF (Global Environment Fund) para incrementar su eficiencia con la implementación del Proyecto de Servicios Ambientales del Bosque (PSAB).



### **3. JUSTIFICACIÓN**

Todo lo expuesto anteriormente, justifica la necesidad de realizar estudios para establecer, mediante inventarios, las “líneas base” de las cantidades actuales de C almacenadas tanto en vegetación, suelo, capa de fermentación del suelo y mantillo de las zonas ribereñas sin perturbación aparente en la parte alta de la sierra y en otras de menor altitud, en perímetros de la zona urbana del municipio de Amecameca. Con esto se tendrán sitios de comparación que permitan un adecuado manejo de proyectos actuales y futuros de PSA referentes al secuestro de carbono.

Ante la carencia de estudios de captura de C sobre sistemas ribereños, este trabajo también propone algunos lineamientos metodológicos para el estudio en campo en ecosistemas ribereños de montaña.

### **4. OBJETIVO GENERAL**

Obtener las líneas base de carbono mediante la estimación del contenido de este elemento almacenado en vegetación, mantillo, capa de fermentación del suelo y suelos de zonas ribereñas de montaña adyacente a afluentes del río Amecameca, para tener elementos de comparación en proyectos de PSA.

### **5. OBJETIVOS PARTICULARES**

- Estimar contenidos de carbono orgánico total en suelo, capa de fermentación del suelo, mantillo, parte aérea de vegetación arbórea, arbustiva y rasante de sistemas ribereños de montaña del río Amecameca, para determinar las líneas base necesarias como requisito, en los proyectos de PSA.
- Comparar el contenido de carbono orgánico total almacenado en dos amplitudes adyacentes al ambiente ribereños y a lo largo de un gradiente altitudinal.
- Caracterizar algunos parámetros físicos y químicos del suelo y capa de fermentación en estudio como N, P, pH, C.E. y relación C:N en dos amplitudes adyacentes al ambiente ribereño y a lo largo del gradiente altitudinal.

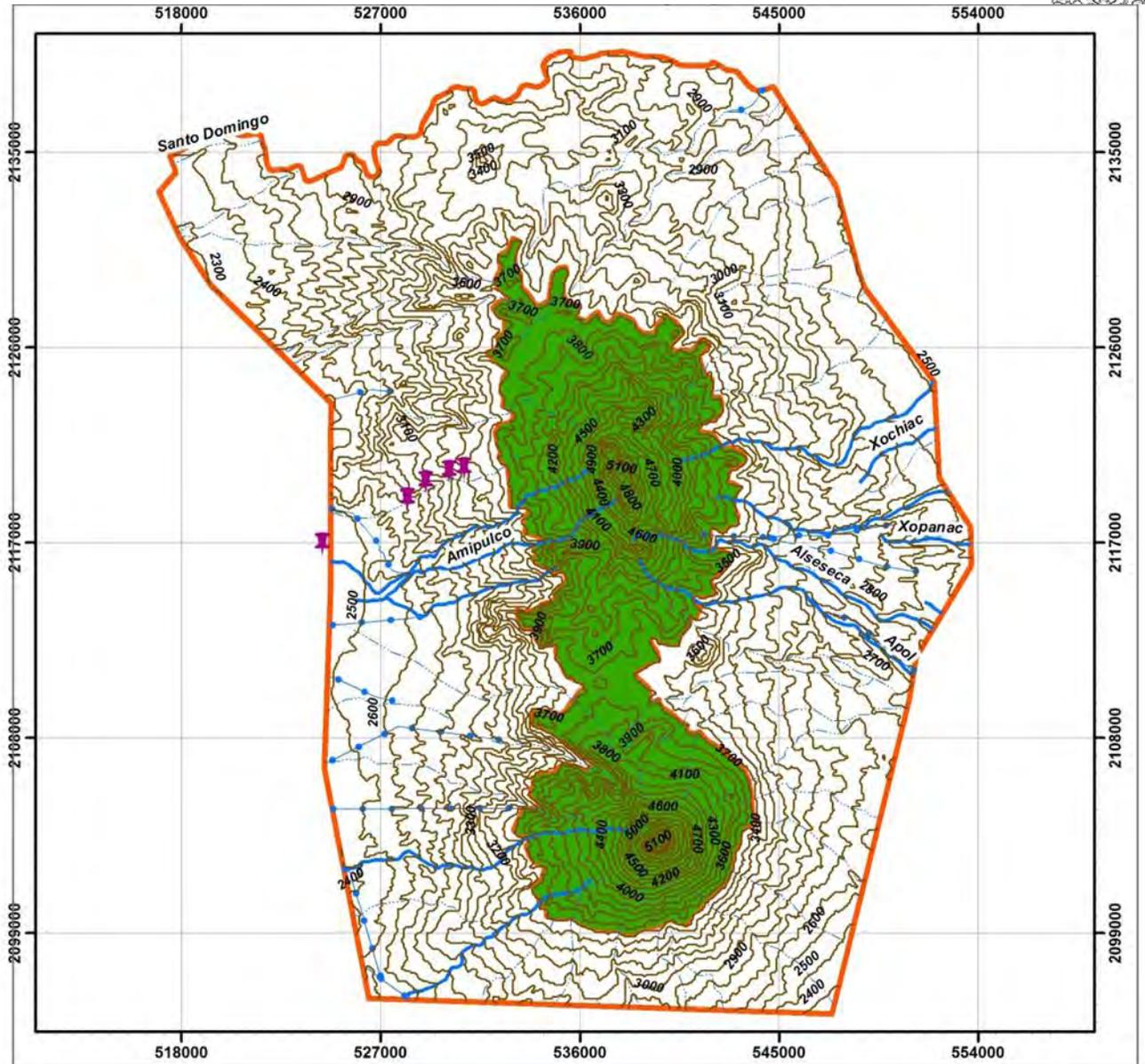


## 6. HIPÓTESIS

La cantidad de C orgánico de cada una de las líneas base será influenciada por el factor altitudinal, estado de conservación del sitio y la distancia con respecto al afluente, donde se espera que los sitios ubicados a mayor altitud y menor perturbación, contengan mayor contenido de C respecto a los de menor altitud y más perturbados como reflejo del cambio de uso de suelo, además, la cantidad de C para cada línea base un 1 m de distancia será mayor en comparación con otras más distantes (amplitud de cinco metros).

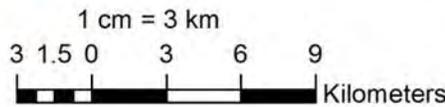
## 7. ÁREA DE ESTUDIO

**Ubicación Geográfica.** Como se muestra en la Figura 8, el Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan (PNIP), se localiza en las coordenadas extremas 18°59'00.43" y 19°28'09.44" de Latitud Norte y 98°34'55.88" y 98°46'40.95" de Longitud Oeste. Su ubicación geográfica en el centro de la región más poblada de la nación, lo hacen invaluable por los servicios ambientales que a ésta le proporciona, especialmente la provisión de agua (CONANP, 2013).



### Simbología

- |  |                       |  |                    |
|--|-----------------------|--|--------------------|
|  | Sitios de muestreo    |  | Topografía         |
|  | PARQUE NACIONAL       |  | ZONA DE INFLUENCIA |
|  | Acueducto Subterráneo |  | Intermitente       |
|  | Perenne               |  |                    |



Escala 1:250,000  
 Sistema de Coordenadas: UTM NAD 27  
 Equidistancia entre curvas de nivel: 100 m

Fuente de datos vectoriales:  
 Datos vectoriales INEGI escala 1:250,000  
[www.inegi.org.mx](http://www.inegi.org.mx)

FES Zaragoza-UNAM  
 Laboratorio de Edafología y Nutrición Vegetal  
 Tesis de Licenciatura

Septiembre de 2012  
 Karina Escalante Vélez  
 Dafne González Mancilla

Figura 8. Ubicación del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl y sitios de estudio.



**Superficie.** Abarca 39,819 hectáreas divididas entre el Estado de México, con 28,307 hectáreas (71.09%); Puebla con 11,072 hectáreas (27.81%); y Morelos con 438 hectáreas (1.10%). Forma parte de los municipios de Texcoco, Ixtapaluca, Chalco, Tlalmanalco, Amecameca, Atlautla y Ecatzingo, en el Estado de México; Santa Rita Tlahuapan, San Salvador el Verde, Huejotzingo, San Nicolás de los Ranchos y Tochimilco, en Puebla; y Tetela del Volcán, en Morelos.

**Clima.** Debido a su topografía y ubicación, el parque tiene una variedad de climas que van del templado húmedo a los climas frío y muy frío; la temperatura disminuye con la altura a razón de 0.68 ° C por cada 100 m.

Por la latitud de esta región se ve afectada en la época fría del año por sistemas de tiempo propios de las latitudes medias, como los frentes fríos y la invasión de masas de aire polar continental; en el verano influyen los sistemas meteorológicos propios de la zona tropical como los huracanes y las ondas tropicales.

**Edafología.** En la región adyacente a las grandes elevaciones, dispuestas de sur a norte, Popocatepetl, Iztaccíhuatl, Telapón y Tláloc, debido a la continua actividad volcánica con la consecuente presencia de derrames y emisión de cenizas, el material parental de los suelos está compuesto por rocas ígneas extrusivas de pómez, acumulación de cenizas volcánicas de diferentes etapas de actividad volcánica y por sedimentos de origen volcánico. La múltiple superposición de capas de tefras (pómez) y cenizas, además de los efectos del intemperismo hídrico, eólico y del clima, en conjunto ejercen efectos diferenciales sobre los procesos de formación de los suelos característicos de esta región que son los andosoles, los cuales debido a su composición y a la acción combinada de estos factores pueden ser vítricos, húmicos, mólicos y ócricos.

El suelo representativo de la región es andosoles mólicos, que se forma a partir de las cenizas volcánicas, aunque su evolución es diversa, según lo accidentado del terreno y de su acumulación. Este tipo de suelo es de baja cohesión, por lo que es muy susceptible de erosión y es al mismo tiempo un suelo muy favorable para la recarga de los mantos freáticos. Cronológicamente predominan rocas como basaltos y andesitas.



De acuerdo con la clasificación de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, 2000), las unidades de suelo presentes en el área del parque son:

- ✚ Litosoles. Suelos someros, con menos de 0.1 m de espesor, formados sobre tepetates y que conservan las características del material parental. Aunque esos suelos pueden estar asociados con regosoles y andosoles en ciertas áreas muy restringidas, generalmente son poco desarrollados debido a la velocidad de percolación del agua que impide el establecimiento de algún tipo de vegetación, lo que aunado al clima presente a altitudes mayores de 4,000 m dificulta el desarrollo del suelo.
- ✚ Regosoles, del griego rhegos, manto. Son suelos formados a partir de material suelto como arena, grava o piedra; en el parque se localizan a altitudes por debajo de los 3,900 m y normalmente son pobres en materia orgánica y nutrientes.
- ✚ Andosoles, del japonés an, oscuro y do, suelo. Se derivan de cenizas volcánicas recientes, por lo que son suelos ligeros con alta retención de humedad y buen contenido de nutrientes, así como de MOS; debido a ésta última y a la proporción de vidrios volcánicos presentes, pueden formar andosoles húmicos que se presentan en áreas forestales poco alteradas; también pueden formar andosoles vítricos en zonas con vegetación de coníferas cuando presentan más del 60% de vidrios, ceniza volcánica y texturas gruesas.
- ✚ Cambisoles, se caracterizan por la ausencia de una capa de arcilla acumulada, humus, sales solubles, o de hierro y óxidos de aluminio. Debido a su estructura y alto contenido de minerales resistentes a la intemperie, pueden ser aprovechados para la agricultura sujeto a las limitaciones del terreno y el clima. La textura de los horizontes del subsuelo debe ser franco arenoso o más fino, con al menos 8% de arcilla en masa y un espesor de 15 cm o más. Estos suelos se forman naturalmente en un medio con materiales originales de textura fina, en todas las condiciones climáticas, topográficas y de la cubierta vegetal.



- Fluvisoles, del latín fluvius, río. Son suelos formados en cañadas, escurrimientos y zonas de depósitos de material reciente; de textura gruesa, su fertilidad es baja debido al escaso contenido de nutrimentos.

Por lo anterior, se comprende que los suelos presentes en todo el parque estarán siempre asociados con su origen volcánico, sin importar la zona, solo variando el grado de desarrollo.

**Hidrología.** Los recursos hídricos que se originan en el Parque Nacional se forman principalmente por el deshielo de los glaciares y la precipitación pluvial abundante en la región, que en algunas zonas sobrepasa los 1000 mm anuales. Las corrientes superficiales pueden ser permanentes o intermitentes, éstas últimas son innumerables durante la época lluviosa y también se produce gran infiltración de agua que va a alimentar las corrientes subterráneas. Los ecosistemas de la Sierra Nevada efectúan procesos que permiten la recarga de acuíferos y mantos freáticos que abastecen buena parte de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México y del Valle de Puebla y Tlaxcala.

La distribución altitudinal de los recursos hídricos se caracteriza por una pendiente pronunciada en su curso alto, arriba de los 4,500 m, y es cada vez más atenuada conforme descienden.

A menos de 4,000 m los arroyos adquieren velocidad y volumen y los manantiales son más frecuentes y abundantes. Por otra parte, por debajo de los 3,500 m las aguas ejercen una fuerte erosión en el terreno ya que su caudal depende de los deshielos y las precipitaciones.

Hacia la parte occidental descienden gran cantidad de arroyos que van a desembocar al norte de la Sierra Nevada en la antigua zona lacustre de la Subcuenca Chalco y Lago de Texcoco, los cuales a través del gran canal del desagüe son tributarios del río Tula y a su vez éste, del río Pánuco que desemboca en el Golfo de México. Hacia el sur de la Sierra Nevada, las corrientes que descienden, contribuyen a formar el río Cuautla que alimenta la subcuenca del río Nexapa tributaria de la cuenca del Balsas. En la vertiente oriental, los escurrimientos del macizo montañoso conforman la subcuenca del Atoyac, tributaria también de la cuenca del Balsas, misma que desemboca en el Océano Pacífico.



**Flora y fauna.** La situación geográfica y el intrincado relieve de esta región favorecen su alta diversidad ecosistémica y gran riqueza biológica que se distribuye en un gradiente altitudinal. La confluencia de las zonas biogeográficas neártica y neotropical le proporciona mezclas únicas de flora, fauna y hongos. La mayor diversidad se encuentra entre los 2,400 y 3,500 m.

El PNIP es el remanente más importante de bosques de coníferas y praderas de alta montaña en el centro del país. Su importancia radica no sólo en la extensión de bosques en buen estado de conservación (más de 21,000 hectáreas de bosque conservado que representan 52.33% de la superficie total del parque), sino en la diversidad de su flora y fauna.

En el PNIP como en todos los bosques, la distribución de la vegetación atiende a la altitud, de modo que pueden distinguirse tres pisos fundamentales, que incluyen zonas de transición o ecotonos donde se llevan a cabo complejas relaciones ecológicas entre las comunidades, dificultando su interpretación y límite altitudinal preciso (Cuadro 2). A pesar de ello, se ha clasificado la vegetación en tres categorías básicas, según la clasificación de Rzedowski (2005).

Cuadro 2. Comunidades vegetales y especies dominantes correspondientes con gradiente altitudinal del Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl (CONANP, 2013).

COMUNIDADES VEGETALES		
Bosque de coníferas		Pastizal
<b>Pino-Abetos</b> 3.000-3.700 m snm	<b>Pino</b> 3.400-4.000 m snm	<b>Zacatonal y pastizal alpino y subalpino</b> 3.500-4.350 m snm
<i>Pinus ayacahuite</i>	<i>Pinus hartwegii</i>	<i>Festuca spp.</i>
<i>P. montezumae</i>	<i>Ribes ciliatum</i>	<i>Calamagrostis tolucensis</i>
<i>P. hartwegii</i>	<i>Lupinus montanus</i>	<i>Muhlebergia quadridentata</i>
<i>Abies religiosa</i>	<i>Acaena elongata</i>	<i>Agrostis tolucensis</i>
<i>Eupatorium pazcuarensis</i>		<i>Juniperus monticola</i>
<i>Senecio platanifolius</i>		

Los bosques de coníferas constituyen la vegetación dominante, continuando con las pradera de alta montaña o pastizal alpino, vegetación herbácea de no más de 50 cm de altura, que colinda con las nieves permanentes. Entre estas dos zonas, se establece un ecotono constituido por una franja de aproximadamente 100 metros, en buen estado de



conservación. Las principales especies que se distribuyen en el ecotono son la *Senecio sp.*, *Digitalis sp.*, *Cnicus benedictus L.*, *Lupinus sp* y *Verbascum thapsus*.

En el Popocatepetl, hasta los 3,100 m de altitud se encuentran asociaciones dominadas por *Pinus montezumae*, que forman un dosel de 20 a 30 m., frecuentemente asociado con especies de los géneros *Quercus*, *Abies*, *Arbutus*, *Alnus*, *Salix* y *Buddleia*. Por su parte, en Zoquiapan la distribución del bosque de pino, dominado por las especies de *Pinus hartwegii* y *P. montezumae*, se asocia más a las condiciones de suelos profundos o someros pero con bastante MOS.

Se establecen asociaciones vegetales de transición entre *Pinus* y *Abies* lo que implica que son zonas de amplia diversidad florística y ecológica conformando rodales mixtos de *Pinus ayacauite* con *Abies religiosa*. En esta zona de ecotono también es frecuente la asociación de *Pinus montezumae* con *Pinus hartwegii*. En estos bosques el dosel no es muy cerrado, lo que permite el establecimiento y desarrollo de diversas especies arbóreas, arbustivas y herbáceas. Entre los géneros mejor representados pueden citarse: *Pinus*, *Senecio*, *Ribes*, *Muhlenbergia*, *Agrostis*, *Lupinus* y *Festuca*.

En el Parque Nacional se distribuyen 8 órdenes, 15 familias y 50 especies de mamíferos; tres de esas especies son endémicas: los ratones *Peromyscus maniculatus* subsp. *cineritius* (probablemente extinta en el medio silvestre), *Peromyscus maniculatus exiguus* (que se encuentra amenazada) y el zacatuche o teporingo (*Romerolagus diazi*), que se encuentra en peligro de extinción. Otras especies amenazadas son la musaraña oscura (*Sorex vagrans*) y el tejón o tlalcoyote (*Taxidea taxus*).

Los roedores son los mejor representados, incluyen tuzas, ardillas y ratones; le sigue el orden de los carnívoros, gato montés, zorros, zorrillos, coyotes y mapaches, entre otros; los quirópteros (murciélagos) ocupan el tercer lugar; con menos especies se encuentran los insectívoros (musarañas), y finalmente los lagomorfos (conejos).

Los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl están considerados por CONABIO como Área de Importancia para la Conservación de las Aves (AICA C-72). Se distribuyen gaviilancillos, aguilillas, correcominos, codornices, lechuzas, búhos, cuervos, cenizales, jilgueros, calandrias, gorriones, azulejos, tórtolas, coquitos, chillones, tigrillos, primavera, etc.



carpinteros, colibríes, chochoyotas, sesetos, cardenales, cacaxtles o charas, tordos y mulatos (CONAMP, 2013).

**Situación Socioeconómica Santa Isabel Chalma.** La localidad de Santa Isabel Chalma está situada en el Municipio de Amecameca (Estado de México); a 2470 metros de altitud, con un total de 2238 habitantes. El uso del suelo actual es forestal principalmente, ya que ocupa la mitad de su territorio y solo el 4% se ocupa como zona urbana, más de una tercera parte es de actividad agropecuaria y una pequeña parte es de pastizales, la superficie urbana de la localidad se divide en dos grupos de los cuales 955 ha son de Bienes Comunes y 60 ha son ejidos.

Los habitantes de la localidad tienen un régimen de aprovechamiento y explotación de los recursos forestales principalmente y solo una pequeña parte se dedica a la actividad agropecuaria.



## 8. MÉTODOS

### 8.1. Delimitación del área de estudio

En esta investigación se estudiaron áreas con diferente uso de suelo como: a) Bosque templado conservado, b) Bosque templado con ecoturismo y c) Zonas urbanas en Santa Isabel Chalma municipio de Amecameca, México (Figura 9). Para establecer los sitios de estudio se determinó su ubicación tanto en mapas satelitales (Google earth), como mapas topográficos (Figura 10).

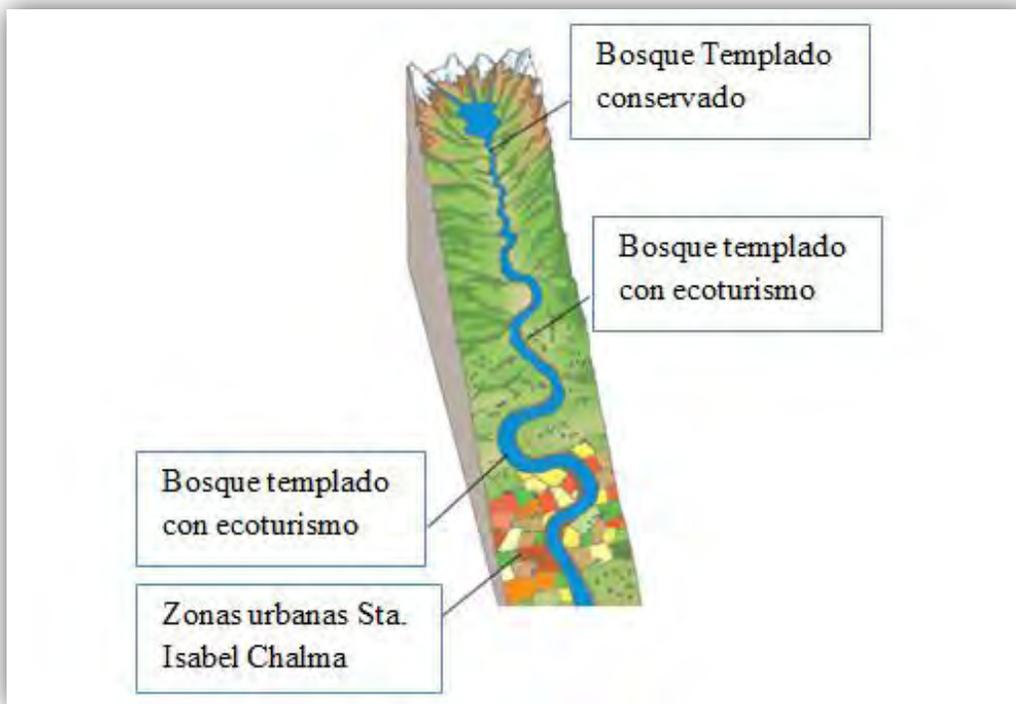


Figura 9. Sitios de estudio con diferente uso de suelo en un gradiente altitudinal.

Una vez seleccionado cada sitio de estudio, se registraron las coordenadas UTM de los sitios de estudio mediante un Sistema de Posicionamiento Global (G.P.S.) y se hizo la descripción fisiográfica, describiendo la pendiente, altitud, exposición, y tipo de vegetación.

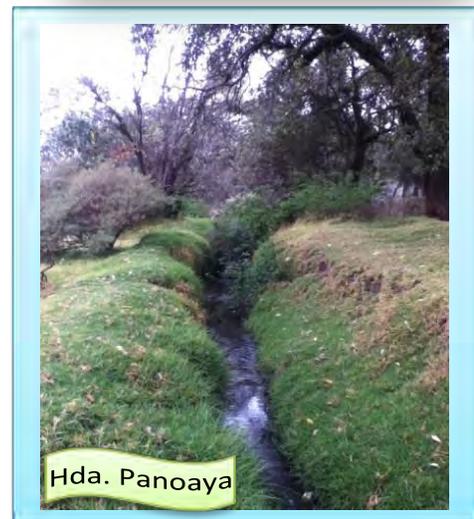
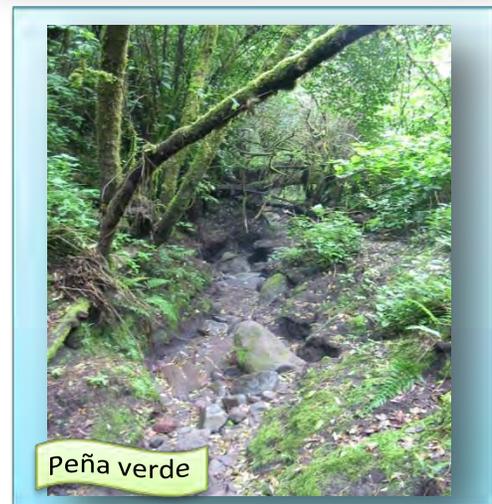
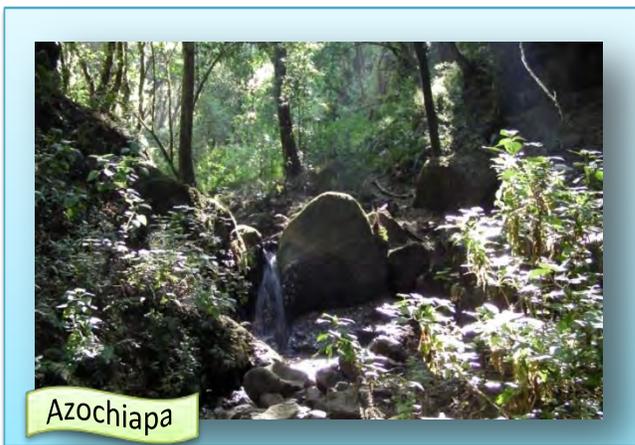
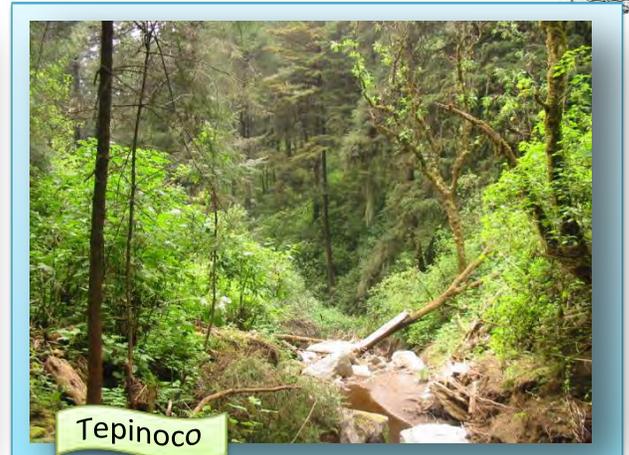


Figura 10. Imágenes de las zonas ribereñas muestreadas.



## 8.2. Registro de datos para cuantificación de C en estrato arbóreo

Para realizar la estimación de C almacenado en el estrato arbóreo en cada uno de los sitios de estudio se utilizó un método no destructivo, se delimitó un área de 30 m × 10 m a cada vera del río, donde se consideraron todos los árboles dentro del cuadro (Figura 11).

Posteriormente se hizo un conteo de los árboles de cada especie presentes, de cada árbol se registró el perímetro a la altura del pecho (PAP) en cm (Figura 12) y se estimó la altura del fuste del árbol (h) en metros con base en comparación visual de una referencia de longitud conocida.

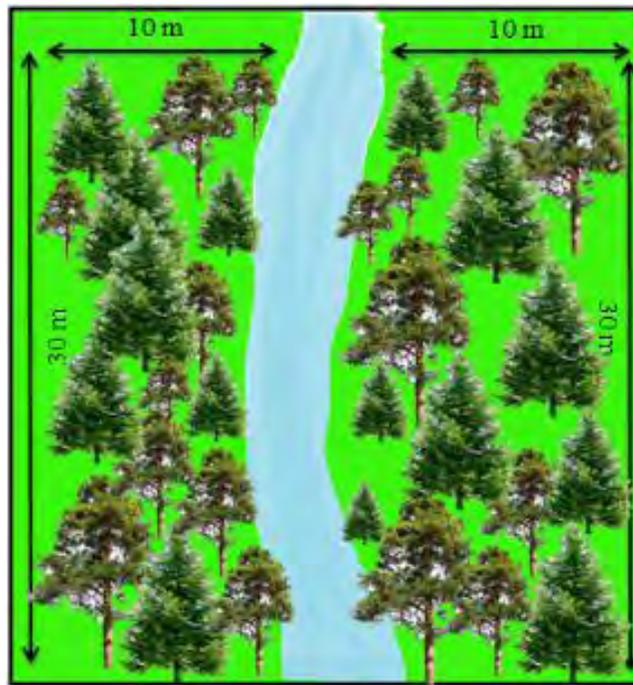


Figura 11. Representación del diseño de la zona de muestreo de vegetación arbórea (10 × 30 m).



Figura 12. Registro de perímetro a la altura del pecho



### 8.3. Toma de muestras de vegetación arbustiva para cuantificación de C

En los seis sitios de estudio para determinar el C en vegetación arbustiva, dentro del mismo cuadrante de  $10\text{ m} \times 30\text{ m}$ , se trazaron dos áreas de  $1\text{ m}^2$  en amplitudes de  $1\text{ m}$  y  $5\text{ m}$ , a cada vera del río (Figura 13), donde se colectaron cuatro muestras representativas por sitio, las cuales fueron guardadas en bolsas de papel estraza y etiquetadas para ser transportadas al laboratorio para su procesamiento.

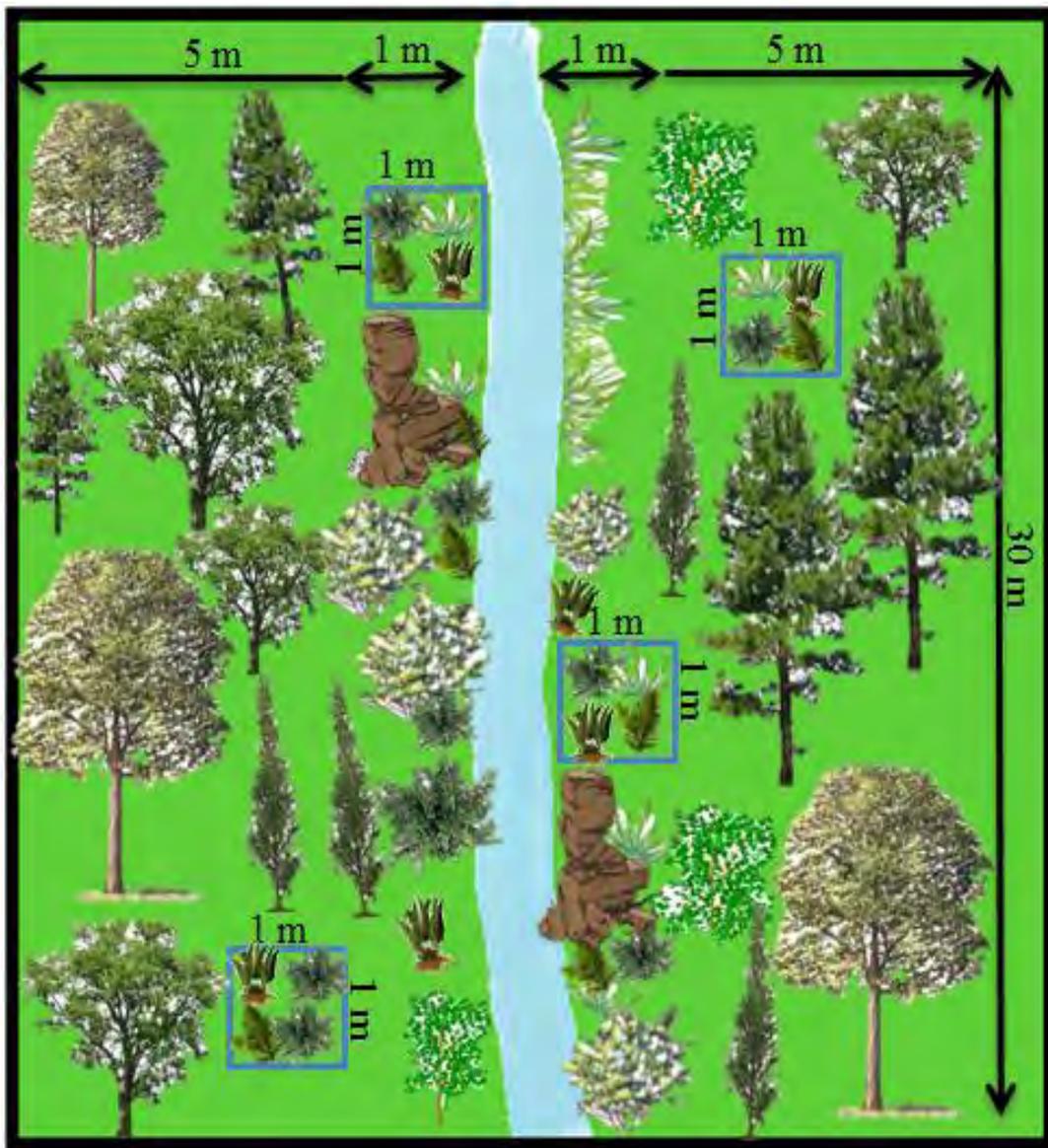


Figura 13. Cuadrantes para toma de muestras de vegetación arbustiva  $1\text{ m}^2$ .



#### 8.4. Toma de muestras de suelo, mantillo y capa de fermentación del suelo

En los sitios de estudio, se definieron áreas de 30 m × 1 m y de 30 m × 5 m de amplitud a cada vera del río (Figura 14), dentro se trazaron cuadros de 25 cm × 25 cm, para la colecta de muestras simples de mantillo y capa de fermentación<sup>5</sup>, con un total de 8 muestras por sitio; además, en la misma área se colectaron ocho muestras simples de suelo de 0-20 cm de profundidad, para formar un total de cuatro muestras compuestas<sup>6</sup> por sitio (Figura 15); todas las muestras fueron almacenadas en bolsas herméticas y etiquetadas para su procesamiento en el laboratorio.

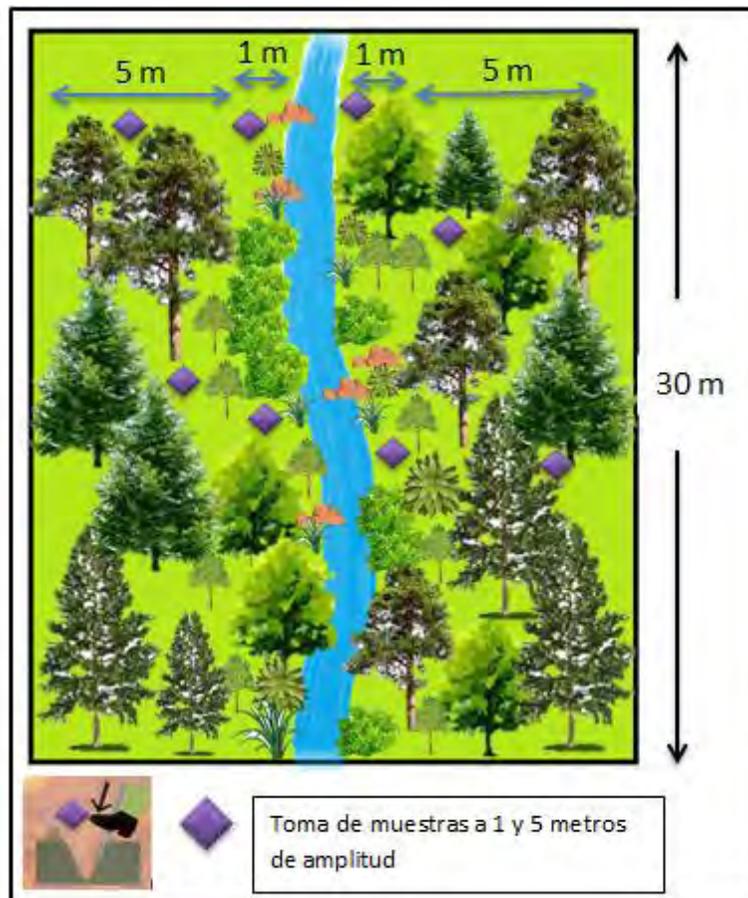


Figura 14. Cuadrantes para toma de muestras de mantillo, capa de fermentación del suelo y suelo a 1 y 5 m de amplitud.

<sup>5</sup> Capa de fermentación: Para esta investigación se tomó el horizonte O<sub>2</sub>, según Cruz (2006), este horizonte presenta restos orgánicos están lo suficientemente descompuestos (ya no se identifica su procedencia).

<sup>6</sup> Muestra compuesta: a) contiene un volumen semejante de cada submuestra y b) Tiene buen proceso de homogeneización.



Cuadrantes de 25 × 25 cm



Toma de muestra de mantillo



Colecta de capa de fermentación del suelo



Toma de suelo de 0-20 cm de profundidad



Almacenaje y etiquetado de muestras

Figura 15. Diagrama de flujo de muestreo y colecta de mantillo, capa de fermentación del suelo y suelo.



## 8.5. Análisis de laboratorio

### 8.5.1. Pretratamiento y procesamiento de muestras

- Mantillo. Las muestras de mantillo en fresco fueron pasadas a través de un tamiz con malla de 2 mm para eliminar el suelo adherido; se pesó en una balanza granataria (marca OHAUS) y se colocó en bolsas de papel estraza etiquetadas, posteriormente se colocaron en una estufa (marca FELISA modelo FE131) a temperatura de 75 °C, y fueron pesadas c/24 h hasta obtener su peso constante.
- Suelo de 0-20 cm y capa de fermentación del suelo. Las muestras fueron colocadas sobre papel bond blanco, en charolas de plástico y secadas al aire (temperatura ambiente), tamizadas a través de una malla de 2 mm, posteriormente se almacenaron en frascos de polietileno y fueron etiquetadas.
- Vegetación arbustiva. Las muestras fueron pesadas en fresco con una balanza granataria (marca OHAUS) posteriormente se colocaron en bolsas de papel estraza etiquetadas, se secaron en una estufa (marca FELISA modelo FE131) a 75 °C, y fueron pesadas en la balanza granataria (marca OHAUS) c/24 h hasta obtener su peso constante.

### 8.5.2. Análisis físicos del suelo

- Conductividad eléctrica del suelo y capa de fermentación del suelo (relación suelo-agua 1:5) con ayuda del Conductímetro (Anexo 1).
- Densidad aparente del suelo, por el método del cilindro (Anexo 1).



### 8.5.3. Análisis químicos de suelo

- ✚ pH activo (relación suelo-agua 1:2) y pH potencial en KCl 1N, (relación 1:2) por el método Potenciométrico, con ayuda de un potenciómetro (Conductronic pH 120), (Anexo 1).
- ✚ Materia Orgánica se utilizó el método de Walkley y Black (Anexo 1).
- ✚ Nitrógeno total con el método de semimicro-Kjeldhal (Anexo 1).
- ✚ Fósforo extractable determinado con ayuda de un espectrómetro (BAUSCH & LOMB) mediante el método de Bray y Kurtz (Anexo 1).

### 8.6. Fase de gabinete

- ✚ Carbono orgánico del suelo (COS), una vez obtenido el contenido de MOS se utilizó el valor de carbono reportado en literatura (Cruz y Etchevers, 2011) para determinar COS mediante la siguiente fórmula.

$$\text{COS} = \text{MOS} \times 0.58$$

- ✚ Carbono en mantillo (Cm) y Carbono en vegetación arbustiva (Cva), a partir de la diferencia de peso fresco y seco se obtuvo la biomasa tanto del mantillo como de la vegetación arbustiva, para obtener el contenido de C se utilizó el siguiente producto (Cruz y Etchevers, 2011):

$$\text{Cm} = \text{biomasa seca} \times 0.58$$

$$\text{Cva} = \text{biomasa seca} \times 0.58$$

- ✚ Vegetación arbórea, a partir de los datos registrados en campo, del perímetro a la altura del pecho y altura del fuste del árbol, se cuantificó el volumen mediante la siguiente fórmula (González, 2008).

$$V_t = (\pi) (r^2) (h)$$



Dónde:

$V_t$  = volumen total del árbol ( $m^3$ )

$\pi = 3.1416$

$r$  = radio del perímetro del árbol (m)

$h$  = altura del fuste del árbol (m)

La biomasa se puede obtener a través de la relación entre el volumen del árbol y la densidad básica de la madera. La densidad de la madera se define como la relación que hay entre el peso y su respectivo volumen y sus unidades son en  $g/cm^3$  o  $kg/m^3$ . Esta última se obtuvo de la literatura para cada una de las especies (Cuadro 6) (Salazar y Meraz, 2002, Nájera *et al.*, 2005; Bárcenas *et al.*, 2008; CONAFOR, 2010). Para conocer la biomasa del fuste ( $B_f$ ) se empleó la siguiente fórmula (González, 2008).

$$B_f = (V_t) (D_m)$$

Dónde:

$B_f$  = Biomasa del fuste (kg)

$V_t$  = Volumen total ( $m^3$ )

$D_m$  = Densidad de la madera ( $kg/m^3$ )

Arredondo *et al.* (2009) menciona que, para obtener la biomasa total ( $B_t$ ) del árbol a partir de datos de registros forestales, se debe conocer la relación de la biomasa del fuste, la copa y las raíces, lo cual se expresa mediante un factor de expansión; El factor de expansión de biomasa es la relación que existe entre la biomasa del fuste y la biomasa total y éste fue obtenido de la literatura para cada una de las especies (Cuadro 6) (Loguercio y Defossé, 2001; Arredondo *et al.*, 2009).

Para obtener la  $B_t$  se utilizó la siguiente fórmula (Loguercio y Defossé, 2001).

$$B_t = (B_f) (F_{exp})$$

Dónde:

$B_t$  = Biomasa total del árbol incluyendo las irregularidades de la copa y raíces (kg)

$B_f$  = Biomasa del fuste (kg)

$F_{exp}$  = factor de expansión de biomasa



## 9. RESULTADOS

### 9.1. Descripción sitios de estudio.

El sistema Chopanac, Sta. Isabel Chalma, es un arroyo de corriente permanente que inicia en manantiales ubicados por los 3200 m de altitud en un bosque de *Abies religiosa* y sigue un cauce que fue estudiado en diferentes sitios hasta los alrededores de la zona urbana de Amecameca (2400 m) donde predominan el uso del suelo agrícola y urbano.

Según el sistema SIATL<sup>7</sup> ([http://antares.inegi.org.mx/analisis/red\\_hidro/SIATL](http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/SIATL)) y la carta topográfica de INEGI (2012), la zona de estudio se ubica aproximadamente a lo largo de 8.3 km. Al considerar los cuadrantes de 30 m × 1 m y de 30 m × 5 m de amplitud ya indicados, el área total del sistema ribereño estudiado tiene una superficie de 8.3 ha, con un área efectiva de muestreo correspondiente a 1,800 m<sup>2</sup>.

El sistema ribereño denominado Chopanac, se encuentra en la zona de influencia del Parque Nacional Izta-Popo. A lo largo de éste se establecieron seis unidades ambientales como sitios de estudio para observación y medición de los contenidos de C (Figura 16).

Como se muestra en el Cuadro 3, en todos los sitios estudiados se observaron especies características de bosques templados como *Abies religiosa*, *Pinus ayacahuite*, *Quercus*, *Eupatorium glabratum*, *Senecio angulifolius*, y que coinciden con lo reportado por Cruz y Etchevers (2011). La exposición predominante en las cañadas de la mayoría de los sitios de estudio están orientadas al sur, con una pendiente del terreno entre 3 y 5 %.

---

<sup>7</sup>SIATL: SIMULADOR DE FLUJOS DE AGUA DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS (INEGI, 2012)

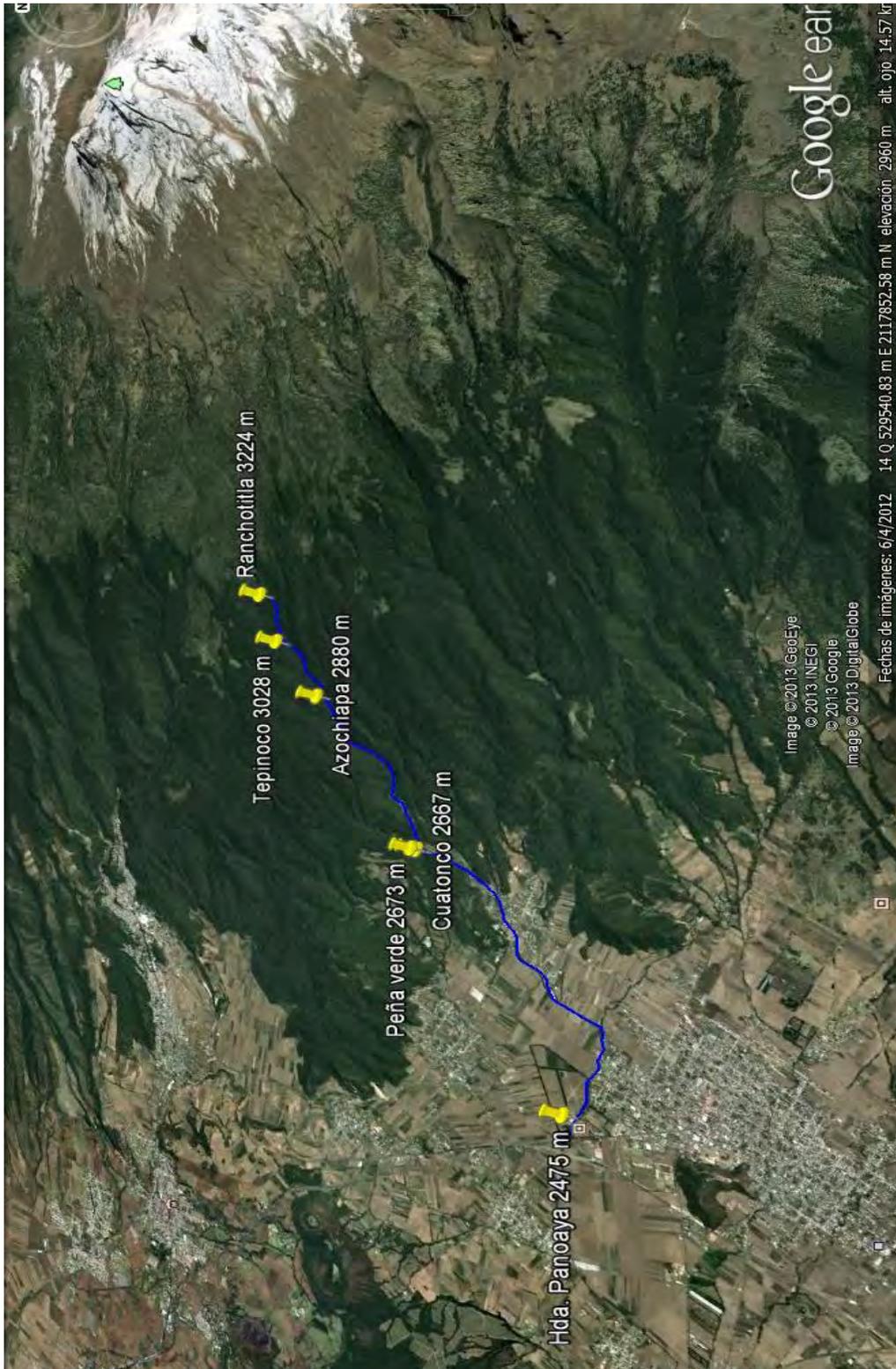


Figura 16. Sitios de muestreo ubicados a lo largo de la zona ribereña del sistema Chopanac, vertiente del río Amecameca (Google earth, 2012).



Cuadro 3. Descripción de las características generales de los sitios de estudio.

Nombre local	Sitio	Latitud		Longitud		Altitud	Pendiente del afluente	Exposición	Especies dominantes		Observaciones
		X	Y	X	Y				Arbustivas	Arbóreas	
		UTM									
		m				%					
Ranchotitla	1	530775	2120366	3224	5	SE	<i>Eupatorium glabratum.</i> <i>Senecio angulifolius</i>	<i>Abies religiosa</i>	Nacimiento del afluente		
Tepinoco	2	530104	2120227	3028	4	SE	<i>Eupatorium glabratum.</i> <i>Senecio angulifolius</i>	<i>Abies religiosa</i>	Roza de vegetación a las orillas del afluente		
Axochiapa	3	529323	2119718	2880	4	SW	<i>Adiantum sp.</i> <i>Asplenium sp.</i> <i>Blechnum occidentale L.</i>	<i>Quercus</i>	Construcción de caja contenedora y entubamiento del río en la parte baja		
Peña verde	4	527225	2118561	2673	3	SW	<i>Asplenium sp.</i> <i>Blechnum occidentale sp.</i>	<i>Pinus ayacahuite,</i> <i>Quercus</i>	Entubamiento en la parte alta, periodos prolongados de sequia		
Cuatonco	5	527224	2118544	2667	4	SE	<i>Senecio angulifolius</i> <i>Plantago plantaginaceae</i>	<i>Pinus ayacahuite</i>	Fácil acceso tanto para personas como para vehículos, así como campismo		
Hacienda Panoaya	6	524052	2116579	2475	3	SW	<i>Rubus rosaceae</i> <i>Lupinus fabaceae</i>	<i>Buddleia cordata</i>	Manejo ecoturístico, descargas municipales		



En el Cuadro 4, se muestran los contenidos de C, N y P, además de algunas propiedades físicas y químicas en el suelo y capa de fermentación del suelo del sistema ribereño, las abreviaturas usadas para cada una de ellas y las unidades en que se representan.

Cuadro 4. Propiedades físicas y químicas determinadas para el estudio del sistema ribereño del afluente Chopanac.

ABREVIATURAS	UNIDADES	PROPIEDADES
<b>COS</b>	(Mg ha <sup>-1</sup> )	Carbono Orgánico del Suelo
<b>Ccf</b>	(Mg ha <sup>-1</sup> )	Carbono en capa de fermentación del suelo
<b>Cm</b>	(Mg ha <sup>-1</sup> )	Carbono en mantillo
<b>Cva</b>	(Mg ha <sup>-1</sup> )	Carbono en vegetación arbustiva y herbáceas parte aérea y raíz
<b>CvA</b>	(Mg ha <sup>-1</sup> )	Carbono vegetación Arbórea
<b>Ns</b>	(%)	Nitrógeno total del Suelo (Semi-micro kjeldahl)
<b>Ncf</b>	(%)	Nitrógeno total en capa de fermentación del suelo (semi-micro kjeldahl)
<b>Ps</b>	(mg kg <sup>-1</sup> )	Fósforo extractable en suelo (Bray 1)
<b>Pcf</b>	(mg kg <sup>-1</sup> )	Fósforo extractable en Capa de fermentación del suelo (Bray 1)
<b>C:Ns</b>		Relación Carbono Nitrógeno en suelo
<b>C:Ncf</b>		Relación Carbono Nitrógeno en capa de fermentación del suelo
<b>pHs</b>	(1:2)	pH activo del Suelo (H <sub>2</sub> O)
<b>pHcf</b>	(1:2)	pH activo de la capa de fermentación del suelo (H <sub>2</sub> O)
<b>CEs</b>	(dS m <sup>-1</sup> )	Conductividad Eléctrica del suelo
<b>CEcf</b>	(dS m <sup>-1</sup> )	Conductividad Eléctrica de Capa de fermentación del suelo
<b>pH(KCl)s</b>	(1:2)	pH potencial del suelo (KCl)
<b>pH (KCl)cf</b>	(1:2)	pH potencial de la capa de fermentación del suelo (KCl)

Se realizó un análisis estadístico simple para conocer la distribución de los datos de COS, Ccf, Cm y Cva (Cuadro 5), un análisis de varianza con la finalidad de identificar la influencia de la altitud y amplitud en el contenido de C en cada uno de los compartimentos del ambiente ribereño y una prueba de comparación de medias de Tukey ( $p \leq 0.05$ ) para determinar las diferencias significativas entre variables.



Cuadro 5. Estadísticos simples de carbono orgánico almacenado a 1 y 5 m del sistema Chopanac a través del gradiente altitudinal.

Sitio	Amplitud	COS		Ccf		Cm		Cva	
		Intervalo	media ± DE	Intervalo	media ± DE	intervalo	media ± DE	intervalo	media ± DE
Ranchotitla	1	Nd	Nd	(5.2 - 13.3)	9.3 ± 5.7	(7.5 - 8.3)	7.8 ± 0.4	Nd	Nd
	5	(115.9 - 132.9)	125.41 ± 6.2	(3.9 - 8.1)	6.5 ± 2.26	(4.2 - 61.4)	22.8 ± 26.3	(0.14 - 3.9)	0.55 ± 1.17
Tepinoco	1	(52.6 - 140.4)	100.27 ± 39.74	(1.4 - 1.4)	1.39 ± 0.01	(1.5 - 3.0)	2.2 ± 1.1	Nd	Nd
	5	(49.9 - 167.3)	113.25 ± 55.19	(0.8 - 5.5)	3.14 ± 3.29	(17.3 - 21.3)	19.3 ± 2.8	(0.06 - 0.2)	0.12 ± 0.12
Azochiapa	1	(67.2 - 111.3)	88.61 ± 17.96	(3.7 - 5.9)	4.77 ± 1.54	(1.4 - 4.5)	3.1 ± 1.5	(0.33 - 1.82)	1.07 ± 1.05
	5	(80.4 - 155.2)	108.33 ± 30.18	(4.4 - 5.1)	4.73 ± 0.47	(2.1 - 5.2)	3.5 ± 1.3	(0.4-0.67)	0.4 ± 0.26
Peña Verde	1	(34.1 - 85.2)	57.55 ± 19.18	(2.1 - 3.7)	2.88 ± 1.14	(4.0 - 15.5)	9.8 ± 8.2	(0.07 - 0.13)	0.1 ± 0.05
	5	(75.1 - 100.4)	87.06 ± 11.7	(2.2 - 4)	3.08 ± 1.23	(13.5 - 22.0)	17.7 ± 6.1	(0.02 - 0.17)	0.09 ± 0.1
Cuatonco	1	(83.6 - 124)	105.84 ± 18.64	(1.6 - 3.1)	2.33 ± 1.09	(3.1 - 16.2)	9.6 ± 9.2	(0.11 - 0.31)	0.21 ± 0.14
	5	(61.5 - 69.1)	66.17 ± 3.03	(0.6 - 2.6)	1.59 ± 1.39	(1.1 - 6.0)	3.5 ± 3.5	(0.04 - 0.10)	0.07 ± 0.04
Hda. Panoaya	1	(81.8 - 130.9)	109.08 ± 16.13	(1.5 - 2.2)	1.79 ± 0.30	(0.9 - 6.1)	2.4 ± 2.4	Nd	Nd
	5	(65.4 - 144.5)	100.9 ± 22.58	(1.1 - 2.3)	1.71 ± 0.58	(1.4 - 4.0)	2.7 ± 1.8	Nd	Nd

COS=Carbono Orgánico del Suelo, Ccf=Carbono en capa de fermentación, Cm=Carbono en mantillo, Cva=Carbono en vegetación arbustiva y herbáceas parte aérea y raíz.

\*Nd= No determinado (No se obtuvo muestra del primer metro por su relieve, talud muy inclinado).

Cuadro 6. Registro diamétrico, densidad de madera y factor de expansión, para la estimación de C en vegetación Arbórea.

Sitio	Especie arbórea	No árboles	-----Altura-----		-----DAP-----		Densidad madera	Fac. de expansión
			Intervalo	Media±DE	Intervalo	Media±DE		
			m				kg m <sup>-3</sup>	
1	Bosque de <i>Abies</i>	33	(5.4-29)	(12.12±7.18)	(0.12-1.27)	(0.45±0.35)	380	1.39
2	Bosque de <i>Abies</i>	26	(3.3-16)	(6.1±4)	(0.02-0.64)	(0.16±0.19)	380	1.39
3	Bosque de <i>Quercus</i>	17	(6-17)	(9.7±3.6)	(0.19-0.66)	(0.33±0.17)	760	0.99
4	Bosque de <i>Pinus-Quercus</i>	14	(4.3-18)	(8.7±4.5)	(0.07-0.74)	(0.28±0.21)	580	0.67
5	Bosque de <i>Pinus</i>	8	(6-9)	(7.2±0.8)	(0.16-0.28)	(0.21±0.04)	400	0.36



## 9.2. Carbono almacenado en los diferentes compartimentos del sistema ribereño a través del gradiente altitudinal.

En general el compartimento que almacena mayor cantidad de carbono orgánico es el suelo, con un promedio de 99 Mg ha<sup>-1</sup> y el compartimento de menor contenido de C almacenado es la vegetación arbustiva con 0.8 Mg ha<sup>-1</sup> (Cuadro 7), con una diferencia de 98 % entre reservorios.

Cuadro 7. Contenidos totales de C por hectárea en sitios ribereños ubicados en un gradiente altitudinal con diferente tipo de vegetación del afluente Chopanac.

Sitio	Tipo de vegetación	Altitud m	Mg ha <sup>-1</sup>					C total
			COS	Ccf	Cm	Cva	CvA	
1	Bosque de <i>Abies</i>	3224	125.4 a	7.6 a	12.9 a	2 a	41.4 a	189.3
2	Bosque de <i>Abies</i>	3028	106.8 a	2.5 b	9.8 ab	0.3 a	13.3 b	132.7
3	Bosque de <i>Quercus</i>	2880	98.5 a	4.8 b	3.3 ab	1.3 a	34.7 a	142.6
4	Bosque de <i>Pinus-Quercus</i>	2673	72.3 b	3.0 b	13.7 a	0.2 b	19.5 b	108.7
5	Bosque de <i>Pinus</i>	2667	86 b	2.0 c	6.6 ab	0.3 a	5.1 b	100.0
6	Vegetación secundaria	2475	104.8 a	1.8 c	2.5 b	-	-	109.1
Promedio			99.0	3.6	8.1	0.8	22.8	130.4
mín-máx			72.3-125	1.8-7.6	2.5-15.3	0.2-2.1	5.1- 41.4	
Desv. est.			23.3	1.54	7.8	0.41	15	

COS=Carbono Orgánico del Suelo, Ccf=Carbono en capa de fermentación del suelo, Cm=Carbono en mantillo, Cva=Carbono en vegetación arbustiva y herbáceas parte aérea; CvA=Carbono vegetación Arbórea.

\*Letras diferentes representan diferencia estadística significativa ( $\alpha = 0.05$ )

\*Los resultados de Cva y CvA del sitio 6 no fueron calculados por falta de datos debido a la política del sitio.

En el sitio 1 ubicado a 3224 m de altitud, donde la vegetación predominante es característica de los bosques de *Abies*, se registró el promedio más alto de COS, Ccf, Cm, Cva y CvA.

En general todos los compartimentos mostraron una tendencia a aumentar la cantidad de C almacenado con forme aumenta la altitud.

El COS registró valores de entre 72 y 125 Mg ha<sup>-1</sup>, cuyo valor máximo estuvo en el bosque de *Abies* (sitio 1 y 2), donde nace el afluente, seguido del bosque secundario de *Buddleia* (sitio 6), y posteriormente los bosques de *Quercus* (sitio 3), de *Pinus* (sitio 5) y el bosque de *Pinus-Quercus* (sitio 4).



La mayor cantidad almacenada de C<sub>cf</sub>, se tuvo en el sitio 1 bajo bosque de *Abies* con un valor de 7.6 Mg ha<sup>-1</sup>, y el valor mínimo con casi 6 Mg ha<sup>-1</sup> menos respecto al primero, fue encontrado en el sitio 6 bajo bosque secundario de *Buddleia*, ubicado a menor altitud, con una tendencia a aumentar la cantidad de C almacenado en este compartimento al aumentar el gradiente altitudinal.

La cantidad de C<sub>m</sub>, tuvo valores que van de 2.5 Mg ha<sup>-1</sup> a 13.7 Mg ha<sup>-1</sup>. El valor máximo correspondió al sitio cuya vegetación predominante es *Pinus-Quercus* (sitio 4), seguido del bosque de *Abies* (sitios 1 y 2), bosque de *Pinus* (sitio 5) y bosque de *Quercus* (sitio 3), encontrando que el valor mínimo fue en el bosque secundario de *Buddleia* (sitio 6), donde se tiene un uso de suelo ecoturístico.

El C<sub>va</sub> y C<sub>vA</sub> mostraron una tendencia a aumentar conforme aumenta el gradiente altitudinal, donde el valor máximo correspondió al sitio 1 (3224 m) bajo bosque de *Abies* con 2 Mg ha<sup>-1</sup> y 41.4 Mg ha<sup>-1</sup> respectivamente, seguido del bosque de *Quercus* ubicado a 2880 m, bosque de *Pinus* a 2667 m y bosque de *Pinus-Quercus* a 2673 m.

En los gráficos de la Figura 17, se muestran los contenidos de C en los diferentes reservorios de las zonas ribereñas; puede observarse que la mayor acumulación de C orgánico se encontró en el sitio 1 a 3224 m de altitud con 189.3 Mg ha<sup>-1</sup>, de esa cantidad, 66 % está en el suelo, 21 % en el estrato arbóreo y 13 % en la vegetación arbustiva, mantillo y capa de fermentación del suelo. Se aprecia una diferencia de casi 90 Mg ha<sup>-1</sup> respecto al valor mínimo de C orgánico en el sitio 5 (2667 m) que tuvo 100 Mg ha<sup>-1</sup> de carbono en total y de las cuales 86 % está en el suelo y el otro 14 % está acumulado en el resto de los compartimentos. La figura también muestra que de 2670 a 3224 m de altitud, la cantidad de C en el suelo aumentó.

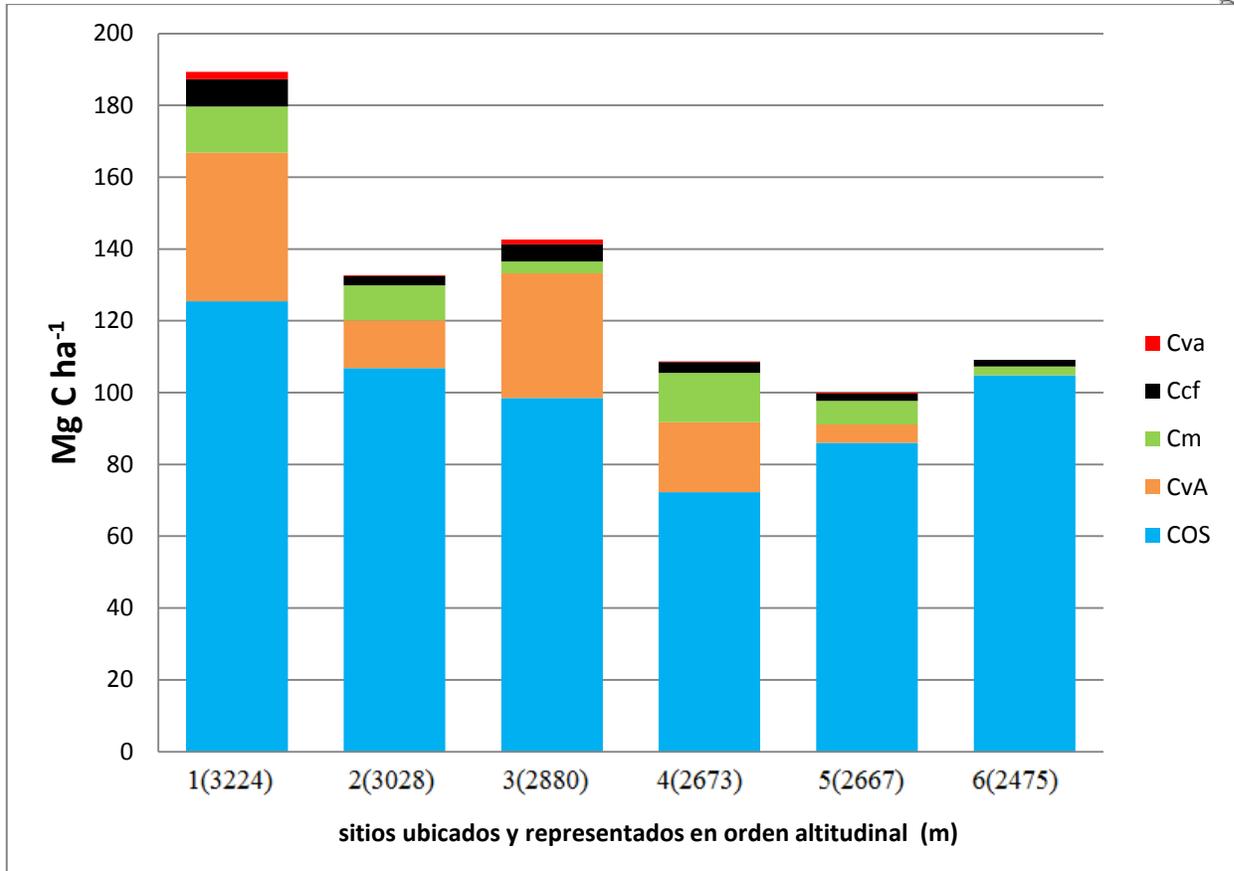


Figura 17. Cantidades de carbono orgánico acumulado en diferentes compartimentos de la zona ribereña en un gradiente altitudinal.

Se determinaron también los valores de pH, C.E. razón C:N, además de N y P del suelo y de la capa de fermentación (Cuadros 6 y 7).

El Cuadro 8 muestra que los contenidos de N en el suelo y capa de fermentación mantuvieron una tendencia a aumentar conforme se incrementa el gradiente altitudinal; los valores máximos fueron en el sitio donde el tipo de vegetación es bosque de *Abies* (3224 m).



Cuadro 8. Contenidos de N, P y valor de la razón C:N en sitios ribereños ubicados en un gradiente altitudinal con diferente tipo de vegetación del afluente Chopanac.

Sitio	Vegetación	Altitud (m)	Ns %	Ncf	Ps mg kg <sup>-1</sup>	Pcf	C:Ns	C:Ncf
1	Bosque de <i>Abies</i>	3224	0.61 a	0.71 a	0.21 b	0.28 a	13.2 a	19.8 a
2	Bosque de <i>Abies</i>	3028	0.43 b	0.62 a	0.25 a	0.28 a	15.5 a	18.1 a
3	Bosque de <i>Quercus</i>	2880	0.49 a	0.58 a	0.28 a	0.26 a	12.9 a	16.4 b
4	Bosque de <i>Pinus-Quercus</i>	2673	0.41 b	0.64 a	0.23 b	0.26 a	10.8 b	18.8 a
5	Bosque de <i>Pinus</i>	2667	0.31 b	0.42 b	0.21 b	0.26 a	15.6 a	21.9 a
6	Vegetación secundaria	2475	0.45 b	0.52 b	0.11 c	0.13 b	15.2 a	17.4 b
Promedio			0.45	0.58	0.21	0.24	13.87	18.73
mín-máx			0.3-0.6	0.4-0.7	0.1-0.3	0.1-0.3	11-16	16-20
Desv. est.			0.14	0.20	0.07	0.07	4.1	4.3

Ns= Nitrógeno total del Suelo, Ncf= Nitrógeno total en capa de fermentación del suelo, Ps= Fósforo Bray en suelo, Pcf= Fósforo Bray en Capa de fermentación del suelo; C:Ns= Relación Carbono Nitrógeno en suelo; C:Ncf= Relación Carbono Nitrógeno en capa de fermentación del suelo.

\*Letras diferentes representan diferencia estadística significativa ( $\alpha = 0.05$ )

Con los datos obtenidos estadísticamente, se observaron dos grupos con diferencias significativas, el primer grupo para Ns abarca sitios desde 2880 m hasta 3224 m de altitud, bajo bosque de *Quercus* y bosque de *Abies*, el segundo grupo es de suelos ubicados en sitios de 2475 hasta 2673 m, bajo bosque secundario de *Buddleia*, bosque de *Pinus* y bosque de *Pinus-Quercus*. Para Ncf el primer grupo de sitios abarca desde una altitud de 2670 m hasta 3224 m con la influencia del bosque de *Pinus-Quercus*, *Quercus* y *Abies*, el segundo grupo estuvo de 2475 m hasta los 2667 m bajo bosque secundario de *Buddleia* y bosque se *Pinus*.

Respecto al Ps, éste tuvo diferencias significativas entre sitios. Se encontraron tres grupos, el primero con valores de 0.21 a 0.28 mg kg<sup>-1</sup> de los 2880 m hasta los 3000 m de altitud bajo bosque de *Quercus* y el inicio del bosque de *Abies*, el segundo grupo de 2660 a 2670 m, donde se encuentra bosque de *Pinus* y hasta bosque de *Pinus-Quercus*, además de los mayores a 3000 m donde la vegetación es de bosque de *Abies* y el tercer grupo a 2475 m con la influencia de bosque secundario de *Buddleia*. La diferencia de mg kg<sup>-1</sup> entre el primer grupo y el segundo fue de casi 16 % y la diferencia del segundo con respecto al tercero de 53 %.



La cantidad de Pcf mostró diferencias significativas entre sitios y aumentó conforme incrementa el gradiente altitudinal. La mayor acumulación fue entre la altitud de 3000 m a 3224 m donde la vegetación predominante es de bosque de *Abies*. La segunda reserva importante fue a 2600 y hasta 2880 m donde la vegetación es de bosque de *Pinus*, *Pinus-Quercus* y *Quercus* y los valores mínimos se encontraron a los 2475 m en donde hay bosque secundario de *Buddleia*.

Las relación C:Ncf mostró valores mayores que los encontrados para C:Ns. Los valores más altos de ambas relaciones se encontraron en el sitio ubicado a 2667 m bajo boque de *Pinus*.

Como se muestra en el Cuadro 9 el pHs fue más ácido en el sitio bajo bosque de *Abies* (3224 m) con valor de 5.2 unidades y el sitio que muestra menor acidez con una diferencia de 1.3 unidades fue en el sitio bajo vegetación dominante de bosque de *Pinus* (2667 m). El promedio general por sitios fue de 5.8 unidades y mostro una tendencia a aumentar la acidez con forme el gradiente altitudinal.

Cuadro 9. pH activo, potencial y CE en sitios ribereños ubicados en un gradiente altitudinal con diferente tipo de vegetación del afluente Chopanac.

Sitios	Vegetación	Altitud m	pHs		pH (KCl)s		CEs dS m <sup>-1</sup>	CEcf
			1:2		1:2			
1	Bosque de <i>Abies</i>	3224	5.2 c	5.3 c	5.2 b	5.2 c	0.32 a	0.08 b
2	Bosque de <i>Abies</i>	3028	5.5 b	6.1 b	5.3 b	5.6 b	0.31 a	0.11 a
3	Bosque de <i>Quercus</i>	2880	6.0 a	5.7 b	5.7 a	5.6 b	0.04 b	0.10 a
4	Bosque de <i>Pinus-Quercus</i>	2673	5.9 b	6.4 a	5.4 b	5.6 b	0.05 b	0.09 b
5	Bosque de <i>Pinus</i>	2667	6.5 a	6.7 a	5.6 a	5.8 a	0.06 b	0.09 a
6	Vegetación secundaria	2475	6.1 a	6.3 a	5.8 a	5.7 a	0.07 b	0.15 a
promedio			5.85	6.08	5.47	5.58	0.14	0.10
mín-máx			5.2-6.1	5.3-6.7	5.2-5.8	5.2-5.8	0.04-0.32	0.08-0.15
Desv est			0.6	0.6	0.3	0.28	0.17	0.06

pHs= potencial de Hidrogeno del Suelo en agua, pHcf= potencial de Hidrogeno de capa de fermentación del suelo en agua, CEs= Conductividad Eléctrica del suelo, CEcf= Conductividad Eléctrica de Capa de fermentación del suelo; pH(KCl)s= potencial de Hidrogeno en cloruro de potasio (1N) del suelo pH (KCl)cf= potencial de Hidrogeno en cloruro de potasio (1 N) de capa de fermentación del suelo.

\*Letras diferentes representan diferencia estadística significativa ( $\alpha = 0.05$ ).



El pH<sub>cf</sub> tuvo menor acidez que el suelo que le subyace. Sin embargo, los valores de pH<sub>cf</sub> mostraron el mismo comportamiento, aumentando su acidez conforme incrementa el gradiente altitudinal, teniendo el valor más ácido para el sitio con mayor altitud donde predomina bosque de *Abies* con 5.3 unidades y el menos ácido fue el sitio donde predomina bosque de *Pinus* con un valor 6.7 y un valor promedio de 6.08.

El pH(KCl)<sub>s</sub> y pH(KCl)<sub>cf</sub> mostraron una mayor acidez que el pH<sub>s</sub> y pH<sub>cf</sub>. En el sitio ubicado a 3224 m (bosque de *Abies*) se presentó la mayor acidez de ambos compartimentos con 5.2 unidades y los sitios de menor acidez con 5.8 unidades fueron el sitio 5 y 6 bajo bosque secundario de *Buddleia* y bosque de *Pinus*. Tanto el pH potencial como activo del suelo y de la capa de fermentación mostraron una tendencia a aumentar la acidez conforme aumenta el gradiente altitudinal.

La CEs mostró una tendencia a aumentar conforme se incrementa el gradiente altitudinal obteniendo los valores más altos en los sitios donde dominan los bosques de *Abies* (3224 y 3028 m) con 0.32 y 0.31 dS m<sup>-1</sup>, seguido del bosque secundario de *Buddleia* (2475 m), bosque de *Pinus* (2667 m), bosque de *Pinus-Quercus* (2673 m) y bosque de *Quercus* (2880 m) donde se registró el valor mínimo de 0.04 dS m<sup>-1</sup>.

Con respecto a la CEC<sub>f</sub>, se encontró el valor más alto en el sitio ubicado a 2475 m con 0.15 dS m<sup>-1</sup>, donde la vegetación predominante es bosque secundario de *Buddleia* y el valor mínimo se tuvo a 3224 m donde se encuentra bosque de *Abies* con 0.08 dS m<sup>-1</sup>, con una diferencia de 46 %, mostrando una tendencia a disminuir conforme aumenta el gradiente altitudinal.

Además de determinar las cantidades de C orgánico en los diferentes reservorios del sistema ribereño a lo largo del gradiente altitudinal, también se determinó la cantidad acumulada de este elemento en suelos ubicados a 1 y 5 m de amplitud con respecto a la vera del río (Cuadro 8), para poder determinar si se tiene un patrón de acumulación uniforme en todos los reservorios, o si se ve favorecida la acumulación de C en suelos de zonas cercanas al afluente, debido a la influencia de la humedad.



### 9.3. Carbono almacenado en los diferentes compartimentos del sistema ribereño a 1 m y a 5 m de amplitud del afluente.

Como se muestra en el Cuadro 10 la cantidad de C acumulado en los diferentes reservorios a 1 y 5 m de amplitud con respecto al afluente no mostraron diferencias, sin embargo, el comportamiento de acumulación para cada uno de ellos es diferente.

Cuadro 10. Contenidos de C por hectárea a 1 y 5 m de amplitud del afluente en las zonas ribereñas del río Chopanac.

Amplitud (m)	COS	Ccf	Cm	Cva	CvA
	(Mg ha <sup>-1</sup> )				
1	92.3 a	3.8 a	5.8 a	0.9 a	22.8 a
5	100.2 a	3.5 a	10.5 a	0.7 a	22.8 a
Promedio	95.9	3.4	8.2	1.1	-
Desv. est.	29.8	2.7	10.6	1.2	-

COS= Carbono Orgánico del Suelo, Ccf= Carbono en capa de fermentación del suelo, Cm= Carbono en mantillo, Cva= Carbono en vegetación parte aérea y raíz; CvA= Carbono vegetación Arbórea.

\*Letras diferentes representan diferencia estadística significativa ( $\alpha = 0.05$ )

El Cs y Cm se encontró en mayor cantidad a 5 m de distancia del afluente con respecto al contenido encontrado a 1 m, con una diferencia de 7.9 Mg ha<sup>-1</sup> en suelo y casi 5 Mg ha<sup>-1</sup> en mantillo.

El contenido de Ccf y Cva mostraron una tendencia diferente, encontrando que la mayor acumulación de C fue a 1 m de distancia del afluente con respecto a suelos ubicados a 5 m, con una diferencia de 0.3 Mg ha<sup>-1</sup> y 0.2 Mg ha<sup>-1</sup> equivalente a 300 y 200 kg C ha<sup>-1</sup> respectivamente.

La relaciones C:N del suelo y capa de fermentación del suelo, además de las cantidades de N total y P disponible son muy importantes para entender la dinámica del sistema por lo que también se determinaron las posibles diferencias en la acumulación de estos en suelos ubicados a 1 y 5 m de distancia con respecto a la vera del río (Cuadro 11).



Cuadro 11. Contenidos de N, P y valor de la razón C:N en suelo y capa de fermentación del suelo a 1 y 5 m de amplitud del afluente en las zonas ribereñas del río Chopanac.

Amplitud	Ns	Ncf	Ps	Pcf	C:Ns	C:Ncf
(m)	%		mg kg <sup>-1</sup>			
1	0.4 b	0.5 b	0.21 b	0.2 b	15 a	19.5 a
5	0.5 a	0.6 a	0.22 a	0.3 a	13 b	18.0 a
Promedio	0.45	0.59	0.20	0.23	14.0	18.5
Desv est.	0.14	0.20	0.07	0.07	4.1	4.3

Ns= Nitrógeno total del Suelo, Ncf= Nitrógeno total en capa de fermentación del suelo, Ps= Fósforo Bray en suelo, Pcf= Fósforo Bray en Capa de fermentación del suelo; C:Ns= Relación Carbono Nitrógeno en suelo; C:Ncf= Relación Carbono Nitrógeno en capa de fermentación del suelo.

\*Letras diferentes entre columnas representan diferencia estadística significativa ( $\alpha = 0.05$ )

El análisis estadístico mostró que existieron diferencias significativas para los contenidos de N y P, tanto en suelo como en capa de fermentación del suelo.

En lo referente al Ns y Ncf, se encontró una mayor disponibilidad en suelos a 5 m con respecto a los ubicados a 1 m, con diferencia de 1 % para ambos casos, destacando que el Ncf fue mayor al encontrado en el suelo.

Con respecto al Ps y Pcf, se encontró mayor disponibilidad en suelos a 5 m que en suelos a 1 m, con una diferencia de casi 5 %; además, este elemento mantuvo las mismas tendencias que el N, por lo que hubo una mayor cantidad de P en la capa de fermentación del suelo, que en el suelo.

La relación C:Ns mostró diferencia significativa, donde los suelos a 1 m de distancia del afluente tuvieron mayor valor en comparación a los de 5 m con 13 % de diferencia. Por otra parte la relación C:Ncf no mostró diferencia significativa, sin embargo, mostró el mismo comportamiento que la C:Ns con casi 8 % de diferencia.

Además de los contenidos de C también se obtuvieron datos de parámetros físicos y químicos del suelo para conocer las relaciones entre las propiedades edáficas estudiadas y los contenidos de C y saber si esas relaciones fueron significativas (Cuadro 12).



Cuadro 12. Valores de pH (H<sub>2</sub>O), pH (KCl) y CE a 1 y 5 m de amplitud del afluente en las zonas ribereñas del río Chopanac.

Amplitud	pHs	pH(KCl)s	CEs	PHcf	pH(KCl)cf	CEcf
(m)	1:2		dS m <sup>-1</sup>	1:2		dS m <sup>-1</sup>
1	6.0 a	5.5 a	0.1 b	6.1 a	5.6 a	0.1 a
5	5.8 b	5.5 a	0.2 a	6.1 a	5.5 b	0.1 a
Promedio	5.9	5.5	0.13	6.0	5.6	0.10
Desv. Est.	0.6	0.3	0.17	0.6	0.3	0.06

pHs= potencial de Hidrogeno del Suelo, pHcf= potencial de Hidrogeno de capa de fermentación, CEs= Conductividad Eléctrica del suelo, CEcf= Conductividad Eléctrica de Capa de Fermentación; pH(KCl)s= potencial de Hidrogeno en cloruro de potasio del suelo pH (KCl)cf= potencial de Hidrogeno en cloruro de potasio de capa de fermentación.

\*Letras diferentes representan diferencia estadística significativa ( $\alpha = 0.05$ )

De las propiedades físicas y químicas del Cuadro 10, las que mostraron diferencias significativas fueron el pHs, pH(KCl)cf y CEs.

El pHs mostró que a la amplitud de 5 m de distancia hay una mayor acidez con respecto a 1 m, con una diferencia de 0.2 unidades.

El pH(KCl)cf mostró que los sitios ubicados a 5 m con respecto al afluente tuvieron una mayor acidez que los sitios ubicados a 1 m de distancia del afluente con diferencia de 0.1 unidades.

En cuanto a la CEs ésta fue mayor a 5 m con un valor de 0.2 dS m<sup>-1</sup> mientras que a 1 m fue de 0.1 dS m<sup>-1</sup> con una diferencia del 50 %.

En la Figura 18, se muestran las cantidades de carbono almacenado a 1 y 5 metros de distancia del afluente para cada uno de los sitios de muestreo a lo largo del gradiente altitudinal, en suelo, capa de fermentación del suelo, mantillo y vegetación arbustiva.

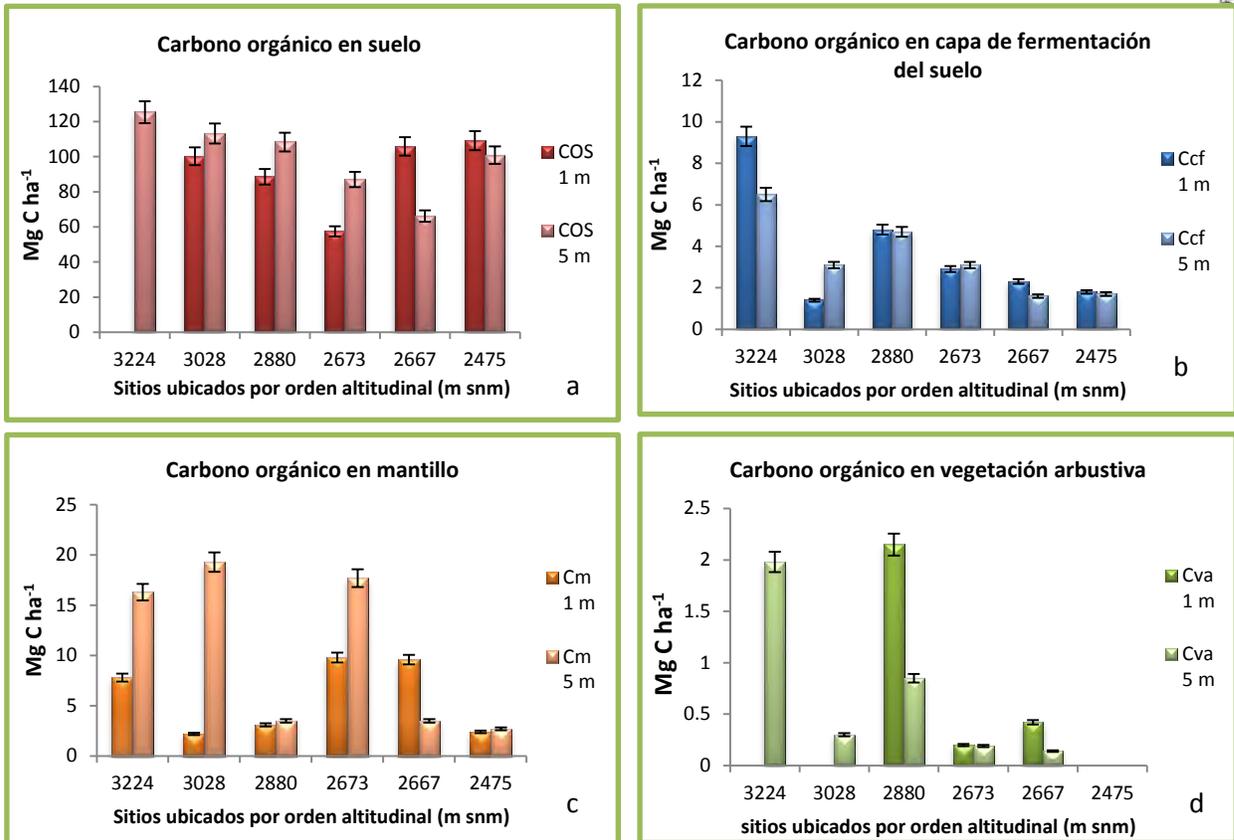


Figura 18. Carbono almacenado a 1 m y a 5 m de amplitud del afluente de los diferentes componentes del sistema ribereño a) En suelo de 0-20 cm de profundidad (COS), b) En capa de fermentación del suelo (Ccf), c) En mantillo (Cm) y d) En vegetación arbustiva (Cva).

La Figura 18a muestra que la cantidad de COS fue mayor a 5 m de distancia del afluente en los sitios ubicados de 2673 m hasta 3224 m donde la vegetación predominante es bosque de *Pinus-Quercus*, *Quercus* y *Abies*, además mostró una tendencia positiva con el gradiente altitudinal; sin embargo, de los 2475 a 2667 m donde el tipo de vegetación es bosque secundario de *Buddleia* y bosque de *Pinus* se mostró un comportamiento distinto teniendo que la mayor acumulación de COS fue a 1 m de distancia del afluente y que éste disminuyó con forme incrementa la altitud.

La Figura 18b muestra que la cantidad de Ccf fue mayor en suelos a 1 m de distancia del afluente en los sitios bajo bosque secundario de *Buddleia* (2475 m), bosque de *Pinus* (2667 m), bosque de *Quercus* (2880 m) y bosque de *Abies* (3224 m), además en los sitios



ubicados a 2673 m y 3028 m donde la vegetación es bosque de *Pinus-Quercus* y bosque de *Abies*, la mayor acumulación de C<sub>ef</sub> a 5 m de distancia del río.

La acumulación del C<sub>m</sub> mantuvo la misma tendencia que el COS. Los sitios con mayor acumulación de C<sub>m</sub> a 5 m de distancia del afluente ( $p < 0.05$ ) fueron los ubicados a 2663 m bajo bosque de *Pinus-Quercus*, seguido de los ubicados a 3028 m y 3224 m ambos bajo bosque de *Abies*. El sitio con mayor cantidad de C<sub>m</sub> acumulado a 1 m de distancia del afluente ( $p < 0.05$ ) fue el ubicado a 2667 m bajo bosque de *Pinus* (Figura 18c).

La cantidad de C en la vegetación arbustiva a 1 m de distancia del afluente no fue determinada en el sitio ubicado a 3224 m porque la orografía a 1 m de distancia del afluente presento suelos menores a 2 cm encontrándose roca madre, por lo cual no fue posible tomar muestras de este sitio y para el sitio ubicado a 3028 m, los comuneros realizaron maniobras de roza-tumba de la vegetación por lo que las muestras ya no serían representativas para el estudio.

El sitio ubicado a 2667 m con bosque de *Pinus* y el ubicado a 2880 m con bosque de *Quercus*, tuvieron la mayor acumulación de C<sub>va</sub> a 1 m de distancia del afluente en comparación con el encontrado a 5 m; además, de que el C<sub>va</sub> aumenta conforme se incrementa el gradiente altitudinal siendo mayor en el sitio con bosque de *Quercus* (Figura 18d).

#### **9.4. Parámetros nutrimentales de suelo y capa de fermentación, relacionados con amplitudes a 1 y 5 metros del sistema Chopanac.**

La cantidad de N total almacenado en suelo mostró una tendencia a disminuir conforme disminuye el gradiente altitudinal, encontrando que en los sitios con bosque secundario de *Buddleia* (2475 m), bosque de *Pinus-Quercus* (2673 m), bosque de *Quercus* (2880 m) y bosque de *Abies* (3028-3224 m), la cantidad de N<sub>s</sub> fue mayor a 5 m de amplitud del afluente, además de que el sitio ubicado a 2667 m bajo bosque de *Pinus* mostró una tendencia distinta teniendo una mayor acumulación de N<sub>s</sub> a 1 m (Figura 19a).

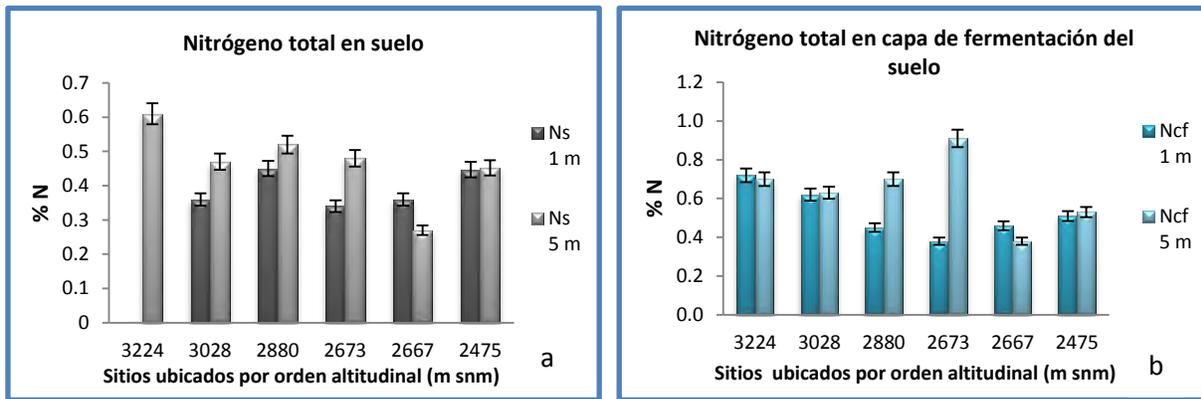


Figura 19. Nitrógeno total a 1 m y a 5 m de amplitud del afluente de los diferentes componentes del sistema ribereño. a) En suelo de 0-20 cm profundidad (Ns), y b) En capa de fermentación del suelo (Ncf).

La Figura 19b muestra que la cantidad de Ncf a 2475 m (bosque secundario de *Buddleia*), 2667 m (bosque de *Pinus-Quercus*), 2880 m (bosque de *Quercus*) y 3028 m (Bosque de *Abies*) fue mayor a 5 metros de distancia, además que los sitios ubicados a 2667 y 3224 m (bosque de *Pinus* y de *Abies*) la acumulación de éste fue inversa siendo la acumulación de Ncf mayor en suelos a 1 m de amplitud.

La Figura 20a muestra que la mayor cantidad de Ps disponible fue en el sitio ubicado a 2880 m bajo bosque de *Quercus* y en mayor proporción a 1 m de distancia del río. A partir de este sitio, al aumentar y al disminuir el gradiente altitudinal, la cantidad de Ps disponible baja; Además en los sitios ubicados a 2475 m (bosque secundario de *Buddleia*), 2673 m (bosque de *Pinus-Quercus*) y 3028 m (bosque de *Abies*) la cantidad de Ps fue mayor en suelos a 5 m de distancia del río.

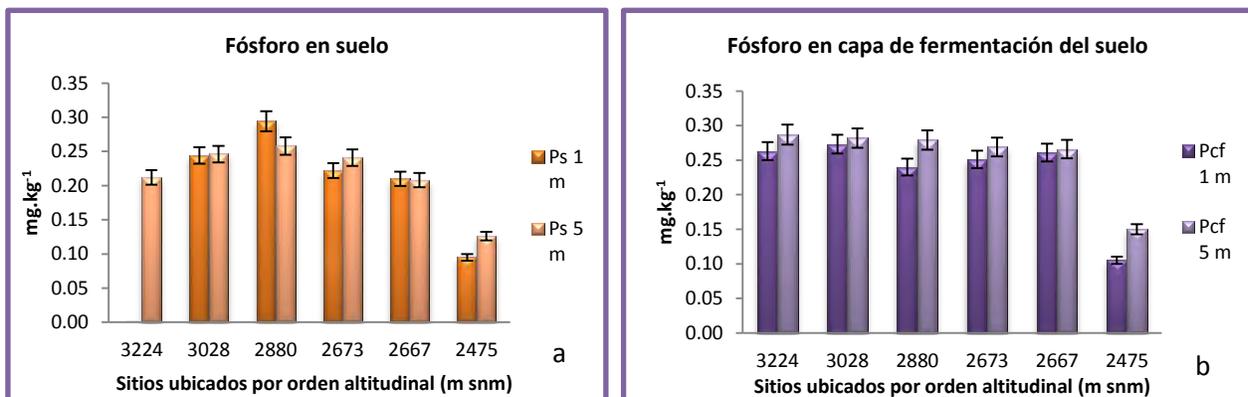


Figura 20. Fósforo extractable a 1 y 5 m de amplitud del afluente en los diferentes sitios de estudio. a) En suelo de 0-20 cm de profundidad (Ps) y b) En capa de fermentación del suelo (Pcf).



La Figura 20b muestra que el P disponible encontrado en capa de fermentación del suelo a través de todo el gradiente altitudinal, fue mayor en suelos a la amplitud de 5 m, y que su acumulación disminuye con el descenso de la altitud.

La proporción C:N en suelo a lo largo del gradiente altitudinal fue mayor a 1 m de distancia del río, donde los valores más altos se mantuvieron en los sitios ubicados a 2475 m y 2667 m bajo bosque secundario de *Buddleia* y bosque de *Pinus* respectivamente; además, esta relación disminuyó a los 2673 m donde la vegetación es de bosque de *Pinus-Quercus*, a partir de este sitio la relación C:N aumenta con forme incrementa el gradiente altitudinal (Figura 21a).

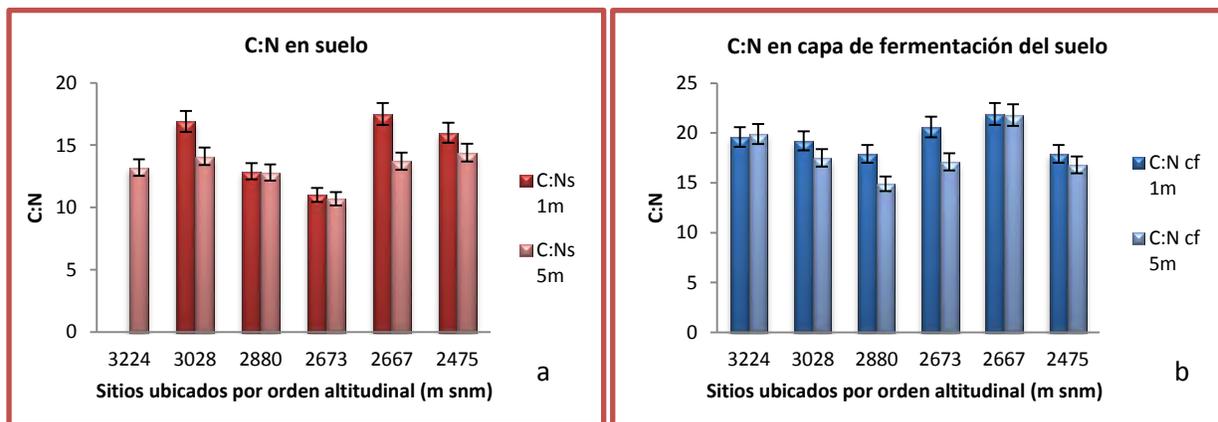


Figura 21. Relación C:N en los compartimentos suelo y capa de fermentación del suelo a 1 y 5 m de amplitud del afluente en los diferentes sitios de estudio. a) En suelo 0-20 cm profundidad (C:Ns) y b) En capa de fermentación del suelo (C:Ncf).

La proporción C:Ncf a lo largo del gradiente altitudinal fue mayor a 1 m de distancia del río. El valor más alto fue en el sitio ubicado a 2667 m bajo boque de *Pinus*; además, la relación C:Ncf no presentó diferencias significativas entre amplitudes, sin embargo de los 2673 y hasta 2880 m bajo bosque de *Pinus-Quercus* y bosque de *Quercus* existen diferencias significativas entre amplitudes (Figura 21b).

La Figura 22 muestra los valores de pH activo y potencial, determinados en el suelo y en la capa de fermentación del suelo, estos valores no mostraron diferencias significativas a 1 y 5 m de amplitud.

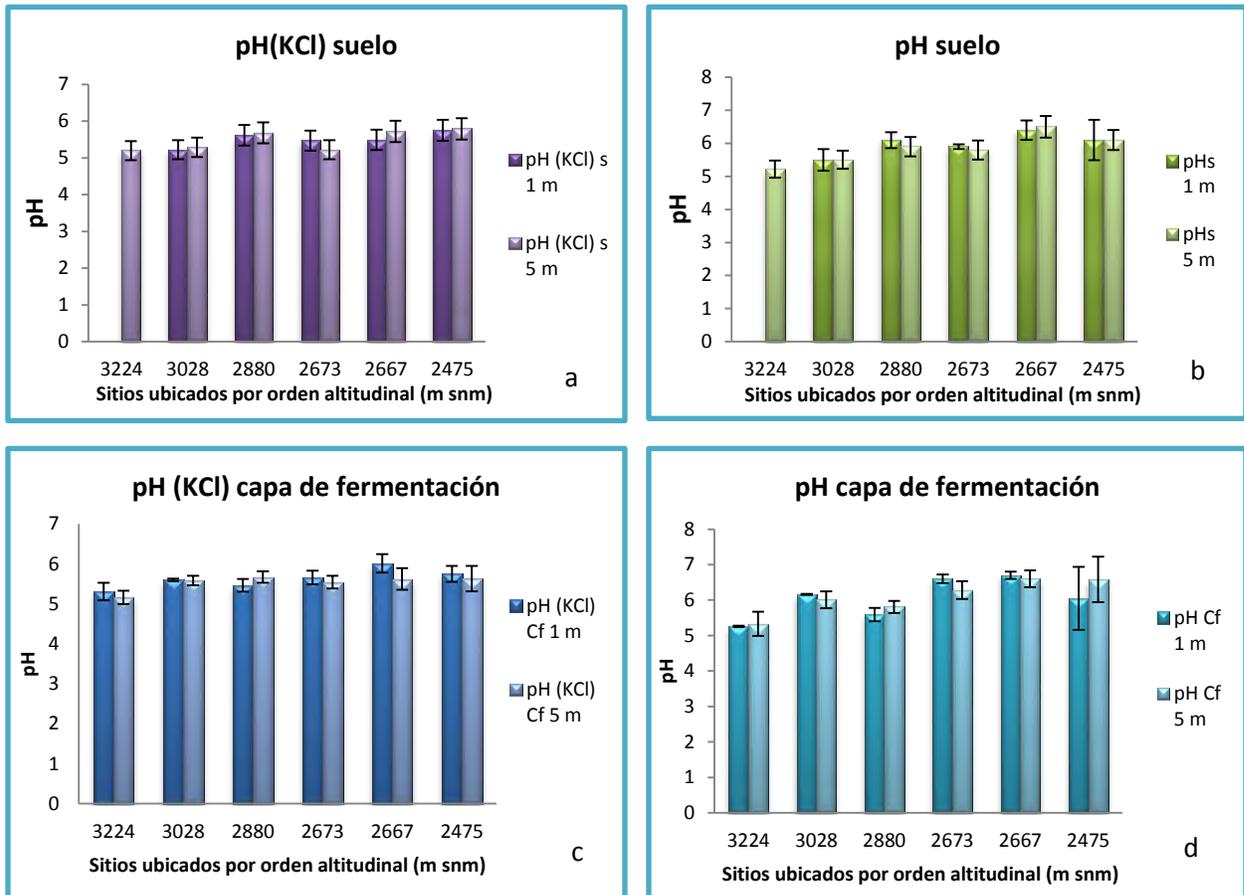


Figura 22. pH potencial y activo en los compartimentos suelo y capa de fermentación a 1 y 5 m de amplitud del afluente en los diferentes sitios de estudio. a) pH potencial del suelo de 0-20 cm de profundidad (pH-KCl<sub>s</sub> 1N), b) pH activo del suelo de 0-20 cm de profundidad (pH<sub>s</sub>), c) pH potencial de la capa de fermentación del suelo (pH-KCl<sub>cf</sub> 1N), d) pH activo de la capa de fermentación del suelo (pH<sub>cf</sub>).

El pH(KCl)<sub>s</sub> en los sitios ubicados a 2475 m (bosque secundario de *Buddleia*), 2667 m (bosque de *Pinus*), 2880 m (bosque de *Quercus*), 3028 m (bosque de *Abies*) y 3224 m (bosque de *Abies*) mostraron mayor acidez a 1 m de distancia del río, a diferencia del sitio ubicado a 2673 m bajo una asociación de *Pinus-Quercus* donde la mayor acidez fue a 5 m (Figura 22a).

El pH<sub>s</sub> mostró mayor acidez con forme al incremento de la altitud. Los sitios ubicados a 2475 y 3028 m no mostraron diferencias a 1 y a 5 m de distancia del afluente, sin embargo, a 2667 m bajo bosque de *Pinus* el suelo fue más ácido a 1 m de distancia y a



2673 y 2880 m bajo bosque de *Pinus-Quercus* y *Quercus* la acidez del suelo fue mayor a 5 m (Figura 22b).

La Figura 22c no muestra una diferencia significativa del pH(KCl)<sub>cf</sub> a 1 y 5 m de distancia; sin embargo, a 5 m de distancia hay un pH más ácido en comparación del encontrado a 1 m; además se observó que el pH(KCl)<sub>cf</sub> a 1 y 5 m disminuye conforme incrementa la altitud.

De modo similar el pH<sub>cf</sub> mostró una tendencia a aumentar la acidez conforme al gradiente altitudinal; además, en los sitios ubicados a 2667, 2673 y 3028 m de altitud, bajo bosque de *Pinus*, *Pinus-Quercus* y *Abies*, la acidez fue mayor a 5 m del afluente y a 2475, 2880 y 3224 m donde la vegetación fue de bosque secundario de *Buddleia*, *Quercus* y *Abies*, la mayor acidez fue a 1 m de distancia del afluente (Figura 22d).

La CE<sub>s</sub> fue mayor a 5 metros de distancia del afluente ( $p < 0.05$ ), en los sitios ubicados a 2475, 2880 y 3028 m, bajo bosque secundario de *Buddleia*, bosque de *Quercus* y bosque de *Abies* respectivamente. De los 2475 m hasta los 2880 m la CE<sub>s</sub> osciló entre 0.03 y hasta 0.07 dS m<sup>-1</sup> y de los 3028 a 3224 m esta fue de 0.21 a 0.42 dS m<sup>-1</sup> (Figura 23a).

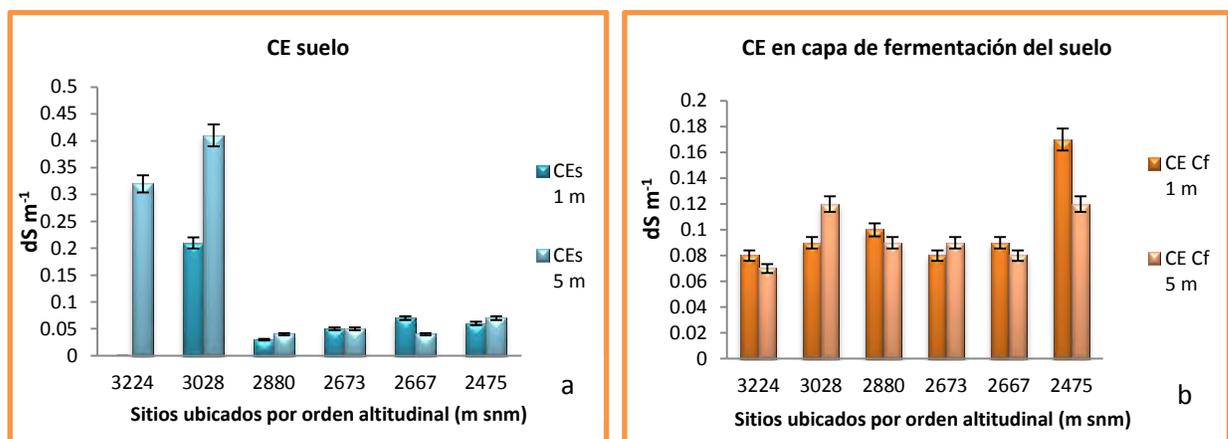


Figura 23. Conductividad Eléctrica de los compartimentos suelo y capa de fermentación a 1 y 5 m de amplitud del afluente en los diferentes sitios de estudio. a) En suelo de 0-20 cm de profundidad (CEs) b) En capa de fermentación del suelo (CE<sub>cf</sub>).

La CE<sub>cf</sub> mostró diferencias significativas entre amplitudes, en los sitios ubicados a 2475 m (bosque secundario de *Buddleia*), 2667 m (bosque de *Pinus*), 2880 m (bosque de *Quercus*) y 3224 m (bosque de *Abies*) la CE<sub>cf</sub> fue mayor a 1 m de distancia de la vera del río; por otro lado en los sitios ubicados a 2673 y 3028 m donde se encuentra bosque de



*Pinus-Quercus* y bosque de *Abies* la mayor CEcf fue a los 5 m de distancia del río. Además la CEcf disminuyó en ambas amplitudes conforme el aumento del gradiente altitudinal (Figura 23b).

## 10. DISCUSIÓN

### 10.1. Contenidos de C en función de la altitud y bajo diferente uso de suelo

De los diferentes compartimentos que almacenan C en el sistema ribereño estudiado en esta investigación, el suelo fue el compartimento que mostró una mayor acumulación de C dentro de un gradiente altitudinal que va desde los 2475 m hasta los 3224 m.

**Carbono Orgánico del Suelo (COS).** Las características biológicas del sitio como la cercanía al afluente, proporcionan condiciones edáficas idóneas que aumentan la productividad de la vegetación de especies arbustivas (Núñez, 2000; Gallardo *et al.*, 2009 y Ortiz, 2010) y que hace que los microorganismos descomponedores realicen una fácil degradación de esta materia orgánica, de acuerdo con Odum (1993), no todas las partes de los cuerpos de plantas y animales se desintegran a la misma velocidad. En efecto, las grasas, azúcares y proteínas se dejan descomponer fácilmente, por lo que al ser los arbustos los principales aportadores de MOS, la degradación es fácil y es incorporada al suelo de manera efectiva. Con los resultados de esta investigación se ratifica lo expresado por los autores mencionados, ya que se encontró que los sitios con mayor cantidad de COS fueron los ubicados en mayores altitudes, con tipo de vegetación de bosque de *Abies* (3224 y 3028 m). En estos sitios la estructura del bosque de *Abies* presenta árboles maduros y vegetación arbustiva no mayor a 1m de altura. Los árboles mantienen en su estructura grandes cantidades de carbono, sin embargo su contribución a la MOS en éste sitio es menor en comparación con la vegetación arbustiva que es el principal aportador de MOS.

Muhammad *et al.* (2007), reportaron que los bosques ribereños y pastizales mejorados en Colombia fueron los usos de suelo con mayor contenido de C reportando valores entre  $52,3 \pm 9,8$  y  $81,3 \pm 3,6$  t ha<sup>-1</sup> respectivamente, en comparación con otros tipos



de uso de suelo estudiados en Costa Rica y Nicaragua, lo que concuerda con los resultados obtenidos en esta investigación, al ser el COS el principal reservorio de carbono en los sistemas ribereños.

Cruz y Etchevers (2011) obtuvieron para suelos forestales del PNIP contenidos de COS entre 23 y 238 Mg ha<sup>-1</sup> en suelos someros de 0 a 20 cm de profundidad. Con los resultados de esta investigación se encontró que en suelos ribereños, el menor contenido de COS (73 Mg ha<sup>-1</sup>) fue tres veces mayor que el valor más bajo reportado para suelos forestales (23 Mg ha<sup>-1</sup>) lo que indica una mayor productividad de los sitios ribereños. Asimismo Rainer *et al.* (2010), en su trabajo “Patrones y concentraciones de Carbón en suelos forestales” realizado en 18 países de la unión europea reportaron que las cantidades de carbono orgánico para suelos de 0-20 cm de profundidad, alcanzan rangos de 11.3 a 126.3 Mg ha<sup>-1</sup>, valor casi siete veces menor que el mínimo reportado es esta investigación. Lo que señala la importancia de los bosques templados en cuanto a su mayor productividad respecto a los bosques de países europeos en latitudes más frías.

Por otra parte Lal (2005), menciona en su trabajo “Suelos forestales y secuestro de carbono” que la vegetación y los suelos forestales contienen alrededor de 1240 Pg de C, donde los reservorios de este elemento varían según la altitud, teniendo que el total de C almacenado en reservorios terrestres de sistemas forestales, es de 37 % para bosques ubicados en altitudes bajas, 14 % en altitudes medias y 49 % en altitudes mayores, siendo estos valores referentes a ecosistemas forestales boreales, templados y tropicales; En esta investigación se mostró que de los 130.4 Mg ha<sup>-1</sup> de C total, 26.7 % fue almacenado en altitudes bajas, 32.1 % en altitudes medias y 41.2 % en altitudes mayores, a lo largo del gradiente altitudinal de la zona ribereña de un bosque templado.

Núñez (2000) reportó que los porcentajes de carbono orgánico del suelo (COS) mayores a 2.5 %, son considerados altos y cuando se encuentran por debajo del 1 % estos son considerados bajos; Los sitios estudiados en este trabajo mantienen valores mínimos de 2.1 % y máximos de 10.4 %, ubicándolos como sitios con media y alta cantidad de COS.

La menor cantidad de COS se encontró en el sitio ubicado a 2673 m de altitud bajo una cubierta vegetal de *Pinus-Quercus*. Este sitio ha sido sometido a estrés hídrico como



consecuencia del entubamiento del arroyo, lo que limita temporalmente la disponibilidad de humedad y descomposición de la materia orgánica para su incorporación al sistema.

**Carbono Orgánico en Capa de Fermentación del suelo (Ccf).** Los resultados obtenidos en esta investigación sobre la cantidad de carbono en capa de fermentación del suelo mostraron una mayor acumulación con el incremento de la altitud, siendo así el sitio más alto el que mayor C acumuló.

Como ya se mencionó el sitio ubicado a 3224 m snm bajo bosque de *Abies*, goza de una buena estructura y densidad vegetal, por lo que de acuerdo con Gallardo *et al.* (2009), el aporte de materia orgánica y elementos minerales a través de la caída de las partes aéreas de la planta, junto con la tasa de renovación de la biomasa subterránea constituye el principal proceso de transferencia de nutrimentos al suelo; por lo que al tener mayor aporte de nutrimentos la densidad de vegetación es mayor.

Bendeck (2009), menciona que la formación de capa de fermentación del suelo depende del tipo de material orgánico, del clima y de la actividad de los organismos, así como las reacciones fisicoquímicas y enzimáticas de los productos biodegradados, los organismos degradadores se ven influenciados por la altitud disminuyendo su metabolismo manteniendo en sus estructuras el C por más tiempo haciendo de la capa de fermentación un buen almacén del carbono.

El segundo sitio con mayor Ccf corresponde a bosque de *Quercus* este sitio es claramente influenciado por el agua del afluente, ya que el ancho del mismo llegó a medir 1 m, y la pendiente es escalonada con una exposición del relieve, proporcionando constante humedad al sitio, por lo que el aporte de materia orgánica de las ramas y follaje de los encinos como de la vegetación arbustiva es sometida a una constante oxidación por la influencia del agua siendo accesible a la descomposición microbiana.

Según Rainer *et al.* (2010), en el trabajo “Patrones y concentraciones de Carbón en suelos forestales”, en la primera capa del suelo (O-layer) la cantidad de Carbono orgánico almacenado estuvo entre 1.3 y 70.8 Mg ha<sup>-1</sup>, los valores reportados en este trabajo se encuentran dentro del rango con un máximo de 7.6 Mg ha<sup>-1</sup> en el sitio bajo bosque de *Abies* ubicado a 3224 m de altitud y un mínimo de 1.8 Mg ha<sup>-1</sup> correspondiente al sitio con



vegetación secundaria ubicado a 2475 m de altitud, debido a que en este sitio, el aporte de MOS es menor porque la cantidad de arbustos y de árboles, presentan baja densidad en comparación con los otros sitios; además la cubierta vegetal en su mayoría está compuesta por gramíneas.

**Carbono Orgánico en Mantillo (Cm).** El sitio ubicado a 3224 m de altitud se almacenó la mayor cantidad de C en mantillo, este sitio corresponde a un bosque de *Pinus-Quercus*, con vegetación arbustiva menor a 1m, donde la materia orgánica es aportada en su mayoría por los árboles.

Arnaldos *et al.* (2004) y Aguilar *et al.* (2011), mencionan que la existencia de mantillo depende de las tasas de producción de cada tipo de comunidad vegetal, de las tasas de mineralización o descomposición y del tiempo que la capa de mantillo tarda en descomponerse, además su velocidad de descomposición varía con el clima y el sustrato.

De acuerdo con lo reportado por Rocha y Ramírez (2009), donde se cuantificó la producción de hojarasca en cinco tipos de vegetación: Bosque de Encino (BE), de Pino-Encino (BPE), de Pino (BP), de Pino-Encino-Liquidámbar (BPEL) y en parcelas en restauración forestal (PR) en dos localidades de Chiapas, la mayor acumulación de hojarasca que se registró en su investigación, fue el bosque de Pino-Encino (BPE) con  $7.59 \pm 0.29 \text{ Mg ha}^{-1}$ , en general, la fracción principal de la hojarasca la constituyeron las hojas (72-90 %), lo que concuerda con esta investigación ya que el bosque que acumuló mayor Cm fue *Pinus-Quercus* con  $13.7 \text{ Mg ha}^{-1}$ , debido al mayor aporte de la hojarasca, que va en función de la comunidad vegetal.

De acuerdo con Odum (1993), los compuestos principales de la materia orgánica de los pinos son: la celulosa y la lignina de la madera; compuestos aromáticos con estructuras químicas fuertes, que son atacadas muy lentamente por los microorganismos que llevan a cabo la degradación de MOS por lo que el carbono se acumula en el mantillo.

En relación a la acumulación de nutrimentos en mantillo, Arnaldos *et al.* (2004) y Aguilar *et al.* (2011), mencionaron que la actividad de los descomponedores se incrementa con la temperatura y la humedad, además de que ésta se reduce con la sequía. En este estudio, la excepción a la tendencia de acumulación de mantillo observada a 2673 m, la



cantidad de C almacenado fue mayor de  $13 \text{ Mg ha}^{-1}$ , muy superior a la encontrada a los 3224 m, posiblemente por una pendiente menos pronunciada que la hace una área de depósito, donde una gran cantidad de árboles de los géneros *Quercus* y *Pinus* que se encuentran cercanos al afluente, aportan gran cantidad de materia orgánica rico en ligninas y donde los periodos de sequía son frecuentes por el entubamiento del afluente en la parte media, que hace una transformación lenta de materia orgánica que se acumula en grandes cantidades.

**Carbono orgánico en vegetación arbustiva (Cva).** De todos los compartimentos que fungen como almacén de carbono, analizados en esta investigación, el estrato de vegetación arbustiva fue el que acumulo carbono en menor cantidad.

La mayor cantidad de carbono que se almacenó en vegetación arbustiva corresponde a un sitio ubicado a 3224 m bajo bosque de *Abies*, con una cantidad de  $2 \text{ Mg ha}^{-1}$  de carbono.

La vegetación arbustiva es una comunidad de especies, que está sometida a desarrollarse bajo ciertas condiciones e interacciones de más comunidades bióticas, también influye en ella el clima, altitud y el tipo de suelo (Odum ,1993).

El bosque de oyamel presenta los tres estratos: arbóreo, arbustivo y herbáceo; siendo el primero, con altura promedio de 34 m el más importante. La especie dominante en esta comunidad es *Abies religiosa* y sus copas suelen cubrir entre el 80 y 100% de la superficie.

En los sitios donde el dosel es cerrado, debido a que la densidad de árboles es elevada, las condiciones de penumbra son tales que los estratos inferiores se encuentran poco desarrollados (CONABIO, 2013).

Esto se debe a la poca incidencia del sol a causa de las copas de los arboles por lo que el crecimiento de las plantas arbustivas es limitado, lo que hace que la biomasa arbustiva sea poca, sin embargo estas especies vegetales no dejan de acumular carbono en sus estructuras.

El menor contenido de C en vegetación arbustiva se tuvo en el bosque de *Pinus-Quercus* (2673 m), donde solo se obtuvieron  $0.2 \text{ Mg ha}^{-1}$ . Como ya se había mencionado anteriormente este sitio se ve sometido a un estrés hídrico debido a un entubamiento del



cauce del río unos metros arriba, y de esta forma solo en temporada de lluvia el agua toma su cauce natural, esto influye de manera significativa al crecimiento nulo de especies arbustivas y rasantes, otros factores que influyen de forma negativa es su ubicación y altitud, ya que este sitio es de fácil acceso, tanto a personas, como a animales (ganado) y a vehículos sin ninguna restricción, perturbando la vegetación.

El manejo de los ejidatarios de Santa Isabel Chalma ha sido durante los últimos años, el de preservar el bosque sin embargo el manejo de la zona ribereña ha sido erróneo, ya que mes con mes hay un desfronde y rosa de vegetación con la justificación de que la vegetación ensucia el caudal y desvía el cauce hasta la llegada del mismo a la comunidad donde es utilizada.

Según Cruz y Etchevers (2011), en las zonas bajo influencia del género *Abies* existe una mayor cantidad de especies tanto del estrato arbustivo como herbáceo mientras que con la cobertura arbórea de los bosques de Pino estos son poco frecuente.

**Carbono Orgánico en Vegetación Arbórea (CvA).** Debido a que el estudio se realizó dentro de las zonas de influencia del PNIP, los valores obtenidos de carbono almacenado en vegetación arbórea, se obtuvieron con la ayuda de ecuaciones alométricas (método no destructivo), por lo que se trató de perturbar lo menos posible las zonas de trabajo.

Según Acosta y Mireles (2002) los árboles almacenan los fotoasimilados en componentes de carbono de sus estructuras leñosas por períodos prolongados, por lo que deben ser considerados como reservas naturales de carbono.

En esta investigación se encontró la mayor cantidad de CvA almacenado en bosque de *Abies* a 3224 m de altitud con  $41.4 \text{ Mg ha}^{-1}$ ; siendo este el segundo compartimento de mayor almacenamiento de C en esta investigación.

Anaya (1962) y Anaya *et al.* (1980), estudiaron los factores bióticos, del clima y suelo, e indican que la asociación de *Abies religiosa* se localiza principalmente en las barrancas, cañadas y partes bajas de laderas que se encuentran comprendidas entre 3,000 y 3,500 m, con tendencia a ocupar lugares con mayor fertilidad, más húmedos, más protegidos, en donde forma masas puras de gran densidad y cobertura, excepto en sus



límites de altitud superior e inferior, donde con frecuencia el bosque es de menor densidad y se mezcla con otras especies.

Velázquez (1992), realizó un análisis fitosociológico de la vegetación de los volcanes Tláloc y Pelado, define con base a especies diagnósticas, a 3 de las 23 comunidades de vegetación estudiadas como bosques de oyamel, utilizando técnicas de análisis de gradientes identificó dos gradientes principales (humedad de suelo y altitud) como los más relevantes para explicar la distribución de las comunidades vegetales como el bosque de *Abies*.

Las investigaciones mencionadas concuerdan con los resultados de este trabajo, ya que el sitio bajo Bosque de *Abies* que se encuentra localizado en la mayor altitud a 3224 m, tienen alta densidad de árboles en la cercanía del nacimiento del manantial (sistema Chopanac), este sitio también se encuentra cerca del área de reserva del PNIP, donde hay mayor vigilancia contra la tala clandestina proporcionando un nivel de confort para el desarrollo de esta especie.

Las propiedades climáticas y altitudinales como la influencia de la cercanía del afluente proporciona un porcentaje de humedad adecuado, haciendo que las condiciones del suelo se mantengan favorables en cuanto a estructura y nutrimentos para el soporte de una mayor cantidad de vegetación proporcionando a la zona ribereña de este sitio una gran densidad arbórea.

Montoya *et al.* (1995), afirman que, a través de la fotosíntesis, la vegetación asimila CO<sub>2</sub> atmosférico, forma carbohidratos y gana volumen. Los árboles como el género *Abies* llevan a cabo fotosíntesis de tipo C<sub>3</sub>, este tipo de fotosíntesis aprovecha de manera eficiente el CO<sub>2</sub> ya que lo mantiene en sus estructuras por mayor tiempo, en comparación con aquellas especies que realizan fotosíntesis tipo C<sub>4</sub>, ya que ellas asimilan más rápido la luz y llevan a cabo procesos de fotosíntesis, renovando sus estructuras, lo que implica la pérdida de carbono de ellas.

El sitio con menor cantidad de carbono almacenado en vegetación arbórea fue el bosque de *Pinus* ubicado a 2667 m de altitud, donde se estimaron 5.1 Mg ha<sup>-1</sup>, en este sitio se encuentran pocos árboles del género *Pinus*, donde el uso de suelo es de tipo ecoturístico, además su ubicación altitudinal como la orografía del sitio hacen de este, un sitio de fácil



acceso para la extracción de árboles maderables, los camiones utilizados para la tala compactan el suelo alterando su estructura lo que limita el desarrollo de más individuos juveniles o la germinación de las especies vegetales. Otro factor que afecta el contenido de C en este sitio, es la falta de conciencia ecológica de las personas que maltratan a los árboles cuando están en su fase juvenil.

Estudios como “Contenido y captura potencial de carbono en el bosque de *Pinus hartwegii* del parque nacional la Malinche”, realizado por Rojas (2004), reporta un promedio de 101 Mg ha<sup>-1</sup> de carbono mediante ecuaciones alométricas, cantidad mayor a la reportada en este trabajo, sin embargo, en esta investigación no se trabajó con esta especie arbórea ni con la misma metodología.

Muhammad *et al.* (2007), reportaron en su investigación que los bosques riparios de Colombia se encontraron  $158,7 \pm 12,5$  t ha<sup>-1</sup> de carbono en la biomasa aérea, presentando el mayor almacenamiento de carbono con diferencia estadística ( $p=0,0042$ ) en el almacenamiento de carbono en biomasa aérea con sistemas de Costa Rica.

En esta investigación la estimación de carbono total de la parte aérea en bosques riparios fue de 114 Mg ha<sup>-1</sup>.

## **10.2. Parámetros físicos, químicos y nutrimentales del suelo y de la capa de fermentación el suelo, en los diferentes compartimentos de los sistemas ribereños en función de la altitud y bajo diferente uso de suelo**

**Nitrógeno del suelo y de capa de fermentación del suelo.** Los contenidos de N en el suelo están directamente relacionados con la materia orgánica y el material parental como lo son las rocas. Más del 95% del N del suelo está en forma de materia orgánica, cuya fracción menos susceptible de sufrir una descomposición rápida es el humus (Plaster, 2000).

Para este estudio el sitio con mayor cantidad de Ns y Ncf del suelo es el bosque de *Abies* (3224m snm), y los segundos sitios con mayor contenido de Ns y Ncf, son los bosques de *Quercus* y *Pinus-Quercus* respectivamente, estos sitios corresponden a los de mayor cantidad de vegetación tanto arbustiva como arbórea, lo que muestra un gran aporte



de MOS, por lo tanto concuerda con las altas cantidades de N, sin embargo, este factor no es el único en describir el comportamiento del N en estos suelos, la fijación biológica del N es llevada a cabo ya sea por microorganismos no simbióticos que pueden vivir independientemente o bien por ciertas bacterias que viven en simbiosis con plantas superiores.

El N es absorbido principalmente por las raíces de las plantas en forma disponible como iones nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) y amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), que también es fijado por descargas eléctricas u otros procesos de la atmósfera. La cantidad de N disponible para las plantas, depende del equilibrio entre mineralización (conversión del nitrógeno orgánico en nitrógeno mineral) y amonificación, dependiendo a su vez, de factores ambientales y de las condiciones del suelo (Campbell, 2005).

La gran actividad microbiana del suelo depende de la descomposición de la materia orgánica, ya que los suelos del bosque de *Abies* de este estudio revelan una gran cantidad de MOS tanto del suelo como de la capa de fermentación, lo que hace que estos organismos fijen el N al suelo y a la capa de fermentación.

Según la NOM-021-SEMARNAT-2000 el N encontrado en suelo y capa de fermentación del suelo en esta investigación es de clase muy alta, Según Gallardo *et al.* (2009), a escala global las variaciones en la eficiencia de la reabsorción de N, se relacionan con la latitud, precipitación y temperatura, además Killingbeck (1996), menciona que el N encontrado en suelos con especies vegetales perennifolias tuvo valores inferiores a 0.70 % lo que indica una reabsorción completa de este. Para este estudio, el valor máximo reportado para suelo y capa de fermentación del suelo fue de 0.61 % y 0.71% respectivamente y valores mínimos de 0.31 % y 0.42 %.

En su trabajo caracterización y dinámicas de C y N de suelos forestales en Oaxaca, Beteta (2011), menciona valores para N de 0.05 % a 0.25 % en suelos forestales de baja actividad antropogénica, en un rango altitudinal de 2031 a 2313 m. Estos valores son inferiores a los reportados en este trabajo cuyos valores son de 0.31 % como mínimo y 0.61 % como máximo en un rango altitudinal de 2475 a 3224 m, sin embargo la metodología de esta investigación difiere, en el gradiente altitudinal, el diferente uso de suelo y el ambiente ribereño.



Por otra parte Schilling *et al.* (2009) en el trabajo “Distribución vertical de carbono total, nitrógeno y fósforo en los suelos ribereños de Walnut Creek, al sur de Iowa USA”, mencionan que a partir de 24 núcleos con profundidad de 3.6 m en la zona ribereña de Walnut Creek, donde el suelo es de tipo Aluvión, el contenido de N en el suelo osciló de 0.1 a 0.42 % y exhibió una fuerte tendencia a disminuir su concentración con la profundidad. En esta investigación los valores de N fueron de 0.31 a 0.61 % sin embargo las muestras fueron colectadas de 0 a 20 cm de profundidad en suelos forestales de zonas ribereñas donde la mayoría de los suelos son Andosoles.

**Relaciones C:N en suelo y en capa de fermentación del suelo.** La relación C:N es un índice muy usado para caracterizar el grado de descomposición de la materia orgánica, según Silva (1998), la acción microbiana puede mineralizar o inmovilizar el nitrógeno y el principal factor que determina cuál de los procesos va a ocurrir es este cociente, cuando es muy alto, parte del nitrógeno del suelo es inmovilizado, y si es bajo, la mineralización del nitrógeno es rápida.

Durante el proceso de descomposición el  $\text{CO}_2$  es liberado y la relación C/N disminuye; de esta forma los microorganismos liberan (mineralizan) N bajo forma de amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) en el suelo. Otros microorganismos rápidamente convierten el amonio en nitrato ( $\text{NO}_3$ ) el cual esta fácilmente disponible para ser absorbido por las plantas.

Importa mucho subrayar que la energía necesitada por los organismos benéficos que fijan el N y contribuyen al transporte del elemento nutritivo ha de provenir de los hidratos de carbono producidos por la planta (Silva, 1998).

Según Flaig (1975) y Sadzawka (1995), la relación C:N promedio de los vegetales es de alrededor de 100, pero, durante la humificación, esta relación disminuye debido al consumo de C como fuente de energía de los microorganismos. Además Perdomo y Barbazán (1999), mencionan que cuando la relación C:N es alrededor de 10, los procesos de humificación están relativamente completos considerando que todo residuo vegetal ha sido descompuesto, donde una porción forma parte del tejido microbiano y la otra es mineralizada a  $\text{CO}_2$  y  $\text{NH}_4^+$ . Además Flaig *et al.* (1975) y Sadzawka *et al.* (1995),



mencionan que en esta etapa cerca de 95% del nitrógeno del suelo está unido en forma orgánica.

En esta investigación la menor razón C:N se reportó para el sitio con bosque de *Pinus-Quercus* a 2663 m de altitud, este sitio reporto altas cantidades de mantillo, aporte de M.O., dado principalmente por los pinos, lo que proporciona a las bacterias mayor alimento y energía; sin embargo este sitio sufre de estrés hídrico con temporadas secas y húmedas, lo que concuerda con lo descrito por Paul y Clark (1989), Davidson *et al.* (1990) quienes mencionan que cuando cortos períodos húmedos y secos se alternan, a menudo hay un aumento de la mineralización, debido en parte a un aumento en el volumen de la población de microorganismos y en parte a los agregados del suelo que se generan durante la fase de secado, haciendo la materia orgánica más accesible a las enzimas microbianas.

En este trabajo la mayor razón de C:N se presentó en bosque de *Pinus* (2667 m) y de *Abies* (3028 m), en el primer sitio el manejo de suelo es de tipo eco turístico, y se encontraron signos de perturbación antropogénico, siendo este utilizado como zona de acampar, y el segundo sitio ha sufrido constantemente de rosa y tumba de vegetación arbustiva lo que provoca un aumento de materia orgánica al sitio, induciendo a una saturación en la mineralización de N, propiciando la inmovilización del elemento, concordando con lo expuesto por Viñegla *et al.* (2006) que mencionaron que en ocasiones las tasas de mineralización pueden ser negativas, lo que se conoce como inmovilización neta, y ocurre cuando la cantidad de nitrógeno incorporado a la biomasa microbiana supera al mineralizado.

**Fósforo disponible en suelo y en capa de fermentación del suelo.** La fuente original de fósforo es el material madre, constituido por rocas fosfatadas, estas rocas son de origen volcánico Brady, N. y R. Weil, (1999).

La mayor cantidad de fósforo disponible se encontró en suelos bajo bosques de *Quercus* (3028 m snm) y *Abies* (2880 m snm) con 0.276 y 0.245 mg kg<sup>-1</sup> respectivamente, el primer sitio de bosque de *Quercus* tienen laderas con fuerte pendiente, esta zona ribereña es ligeramente ondulada y escalonada, las laderas cuentan con rocas grandes que sobresalen, esto influye considerablemente en el aporte de P ya que el viento y el lavado del



agua intemperiza la roca lo cual lo hace más susceptible al arrastre por la acción de la gravedad.

Los valores más altos de Pcf (0.277 y 0.275 mg kg<sup>-1</sup>) se encontraron en sitios con bosques de *Abies* (3028 y 3224 m snm), estos sitios por su alta cantidad de MOS y su capacidad de degradación por los organismos descomponedores del suelo presenta pH ácidos entre 5.3 y 6.1, según Sanzano (2013), el P muestra un comportamiento diferente al de otros elementos como el N o el C, ya que la disponibilidad de este se ve influenciada de forma directa por el pH del medio en que se encuentre, teniendo que en ambientes con pH menores de 4 y mayores de 6.5 este elemento presenta una disponibilidad mínima y según la NOM-021-SEMARNAT-2000, se clasifica a los suelos de esta investigación en clase de disponibilidad baja, debido a sus concentraciones menores de 15 mg kg<sup>-1</sup>. Ayala (2011), encontró valores promedio de 0.53 mg kg<sup>-1</sup> de P en suelos de ambientes ribereños del PNIP. Sin embargo los sitios de estudio de su trabajo abarcan de 1987 a 3886 m de altitud donde la mayoría de los sitios se clasifican como forestal-ganaderos por lo que hubo mayor aporte de este elemento.

Schilling *et al.* (2009), en su trabajo sobre “Distribución vertical de carbono total, nitrógeno y fósforo en los suelos ribereños de Walnut Creek, al sur de Iowa USA”, mencionan que la cantidad de fósforo promedio en una columna de 2.7 m de profundidad es de 574 mg kg<sup>-1</sup>, cantidades mucho más elevadas que las encontradas en esta investigación (0.28 y 0.11 mg kg<sup>-1</sup>), sin embargo el suelo del sitio estudiado por Schilling es clasificado como aluvión, donde la principal característica es el aporte de sedimento de las zonas circundantes siendo un sitio de depósito de elementos como P que es proporcionado por las zonas de cultivo cercanas.

**pH activo y potencial del suelo y de la capa de fermentación del suelo.** Según autores como Vásquez (2005) y Rozas *et al.* (2011), el pH es una de las propiedades químicas más relevantes, controla la movilidad de iones, precipitación y disolución de minerales, reacciones redox, intercambio iónico, actividad microbiana y la disponibilidad de nutrimentos. El pH activo de los suelos estudiados fluctuó entre 5.2 y 6.4, encontrando la mayor acidez del suelo a 3224 m de altitud (bosque de *Abies*), donde la estructura del



bosque está compuesta por arboles maduros, vegetación arbustiva, y especies vegetales rasantas, debido a que la cobertura de sus copas es casi 90 %, de la superficie, limitando entrada de la luz solar, haciendo de este sitio guarde mucha humedad, y entrada de grandes cantidades de M.O., y por la actividad microbiana que realiza la descomposición, hacen ácido este suelo.

Según Goijberg y Aguilar (1987), el valor de pH del suelo indica la magnitud de la acidez activa, esto es, la concentración de  $H^+$  en la solución en equilibrio con la fase solida del suelo, pero no constituye una medida de la acidez potencial la cual podría tener una magnitud muy diversa para cualquier valor dado de pH.

Los valores de pH potencial variaron entre 5.2 y 5.7, siendo menores a los valores de pH activo lo que indican predominio de cargas negativas. Según Sadzawka y Carrasco (1985), el pH activo tiende a aumentar y el pH potencial a disminuir con la profundidad del suelo, lo cual se explica por un incremento en la cristalinidad de los componentes del suelo. Tomando en cuenta los datos de la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000, los suelos estudiados se clasificaron como moderadamente ácidos y fuertemente ácidos, por lo que están dentro del rango para la disponibilidad de P y N.

Cruz y Etchevers (2011), citaron valores de pH de suelos en diversos Parques Nacionales reportando un pH promedio para el PNIP de 5.7 el cual se clasifica como fuertemente ácido y reportan que estos suelos deben su acidez, entre otras cosas a que derivan de rocas ácidas (andesitas-dacita) aunado a de su elevado contenido de materia orgánica.

El valor de pH en capa de fermentación, se mantuvo en un intervalo de 5.3 a 6.7 clasificándose entre moderadamente ácido y neutro según la NOM-021-SEMARNAT-2000.

**Conductividad eléctrica del suelo y de la capa de fermentación del suelo.** López (2010), encontró que especies forestales como *Abies* y *C. lusitánica* mantienen depósitos secos de sales en su follaje, principalmente de K, Mg, Na y Ca, los cuales son incorporados al suelo mediante el lavado por acción de la lluvia.

Andrade *et al* 1995, Bellot y Escarre, 1989. Mencionaron que la vegetación tiene un papel importante al interceptar el agua de la lluvia; a medida que esta atraviesa la cubierta



forestal, la composición química sufre alteraciones como resultado del lavado de depósito seco sobre el follaje y los cambios en el dosel arbóreo a través de la lixiviación de nutrimentos en el follaje y fuste así como la absorción directa por la copa.

Los sitios con mayor CEs fueron los correspondientes a bosques de *Abies* (3028 y 3224 m); en estos sitios se encontraron 0.32 y 0.31 dS m<sup>-1</sup>, esto se debe a que sus suelos se originaron a partir de rocas con tendencia acida (origen volcánico), además que se encuentra el manantial del afluente, por lo que las pocas sales proporcionadas por el material parental son continuamente lavadas por el agua.

La Conductividad eléctrica tuvo valores más altos en suelo respecto a los de capa de fermentación, con promedio de 0.14 dS m<sup>-1</sup> y 0.10 dS m<sup>-1</sup> respectivamente, debido a que en la capa de fermentación hay mayor acides y menor concentración de bases; Además, la CE mostró una disminución conforme decrece la altitud encontrando para sitios ubicados a 3028 y 3224 m valores de 0.3 dS m<sup>-1</sup> y en sitios ubicados a 2475 y 2880 m, valores de 0.04 a 0.07dS m<sup>-1</sup>. Según la NOM-021-SEMARNAT-2000 la CE mantiene efectos de salinidad despreciable.

### **10.3. Contenidos de C en diferentes compartimentos de sistemas ribereños en función de la amplitud y bajo diferente uso de suelo**

**Contenido de carbono orgánico.** Desde los ámbitos científico y administrativo o legal se han realizado múltiples intentos para acotar espacialmente el término de ribera. La complejidad inherente a la naturaleza de estas zonas de ribera se añade su cariz de interface o ecotono entre los ecosistemas terrestres y los acuáticos, provocando que sea complejo delimitar con precisión este espacio (González y García, 1995). El análisis estadístico mostró que los valores encontrados a 1 y 5 m de distancia del afluente no tuvieron diferencia significativa para ninguno de los compartimentos estudiados, probablemente a que las amplitudes estudiadas están influenciadas de manera constante por la cercanía del afluente, en comparación con amplitudes mayores a 5 m. donde ésta influencia es menor por lo que podrían observarse cambios significativos.



A pesar de que no hubo diferencia significativa entre amplitudes el comportamiento de almacenaje para cada uno de los compartimentos fue distinto. Los suelos a 5 m de amplitud mostraron ser más profundos y con una estructura más estable, en ellos se establecen especies vegetales tanto arbóreas como arbustivas con mayor cobertura por lo que la superficie expuesta es menor, a diferencia de los suelos a 1 m de distancia de la vera del río que mostraron ser someros, donde la cobertura vegetal arbórea en comparación con la de 5 m fue mínima o nula en algunos sitios.

La materia orgánica aportada por los árboles y arbustos se acumula en amplitudes a 5 m del río, a diferencia de la que es aportada a 1 m que queda expuesta a ser arrastrada por acción el agua y el viento, por lo que las cantidades de COS y Cm fueron mayores a la amplitud de 5 m.

Debido a la mayor influencia de humedad aportada por la cercanía al cauce a 1 m de distancia del afluente, las condiciones son favorables para la actividad microbiana, lo que aumenta la mineralización de MOS y la disponibilidad de nutrimentos en solución; a pesar de no encontrar plantas con tallas mayores a esta amplitud su densidad es mayor en comparación a las encontradas a 5 m, por lo que la capa de fermentación del suelo y la vegetación arbustiva, tuvieron mayor acumulación de C orgánico a 1 m de distancia del afluente.

#### **10.4 Parámetros físicos, químicos y nutrimentales del suelo y de la capa de fermentación el suelo, en los diferentes compartimentos de los sistemas ribereños en función de la amplitud y bajo diferente uso de suelo**

**Nitrógeno y fósforo en suelo y capa de fermentación del suelo.** Bendek (2009), menciona que los restos vegetales y animales son la materia prima para la formación de MOS, la cual tiene que sufrir una serie de transformaciones ya sea de descomposición, mineralización o humificación, liberando diferentes compuestos como bióxido de carbono, nitrógeno amoniacal, nítrico, sulfatos y fosfatos, por lo que de manera natural, hay una mayor cantidad de estos compuestos en la primera capa del suelo (capa de fermentación), que directamente se refleja en una alta presencia de estos compuestos depositados en el



suelo, lo que explica las mayores cantidades de N y P tanto en suelo como de la capa de fermentación encontradas en amplitudes de 5m.

El N y el P dependen tanto de la materia orgánica y la vegetación como del material parental. Estos elementos y sus ciclos llevan mejor sus procesos en suelos ubicados a 5 m del río los cuales cuentan con una mejor estructura donde hay menor influencia del agua evitando que los nutrimentos sean arrastrados por la escorrentía; además a esta amplitud la vegetación esta mejor establecida y la influencia del agua es específicamente requerida para los procesos de oxidación de la nitrificación, como la aireación, temperatura y humedad; cuando estas características se cumplen, los iones de amonio de carga positiva se unen a partículas y materias orgánicas del suelo que tienen carga negativa, evitando ser lixiviados, brindando un suelo fértil (Martínez, 2012).

En cuanto al P es importante mencionar que este elemento se origina a partir de material parental como las apatitas y su movilidad al sistema es específico, por lo que la erosión, escurrimiento y lixiviación son fuentes de salida de este elemento en el sistema suelo-planta, lo que explica que a 1 m de distancia del afluente donde el contacto con el agua es mayor y la superficie del suelo está expuesta, la concentración de este elemento sea menor debido a las pérdidas por arrastre.

El P orgánico también es aportado por la materia orgánica y su ciclo de renovación es indispensable para procesos metabólicos de las plantas, éste se encuentra en todos los tejidos vegetales en una porción cuyo valor medio puede situarse entre 0.5 y 1% de la materia seca, ésta al ser depositada en el suelo y por degradación enzimática libera el P para una rápida reposición de éste a la solución del suelo y es particularmente importante donde las raíces están absorbiendo activamente al P para integrarlo de nuevo al ciclo (Jungk, 1993).

La disponibilidad del P también depende del pH del suelo. En suelos ubicados a 5 m el valor de pH fue de 5.8 en promedio y el de capa de fermentación del suelo fue de 6.1 por lo que el P está disponible, de forma inmediata para las plantas.



**Relación C:N en suelo y en capa de fermentación del suelo.** Para una buena humificación de la MOS, es muy importante que la cantidad en C y N esté situada entre unos determinados valores, debido a que la microflora edáfica, que actúa en la descomposición y mineralización de la materia orgánica, requiere carbono como fuente de energía, y nitrógeno como intermediario en la síntesis de proteínas. Si no disponen de alguno de estos elementos, la mineralización disminuye su velocidad y por consiguiente la producción vegetal no dispone de suficientes nutrientes para su desarrollo y a su vez, el suelo puede perder parte de su estructura.

Silva (1998), menciona que esta relación evalúa la calidad de los restos orgánicos del suelo y determina el grado de mineralización de la materia orgánica, cuanto menor sea esta relación, mayor será el grado de mineralización. La relación C:N tanto en suelo (15:1) como en capa de fermentación del suelo (20:1) fue mayor a 1 m de distancia del afluente, haciendo que la movilidad de los elementos sea menor y tengan un tiempo medio de residencia menor en comparación a la relación C:N de suelos (13:1) y capa de fermentación del suelo (18:1) a 5 m.

A la amplitud de 5 metros la relación C:N fue menor, debido a que la materia orgánica del suelo tiene una mayor tasa de mineralización, relacionada con la actividad microbiana, por lo tanto la calidad edáfica es superior.

**pH activo del suelo y de la capa de fermentación del suelo.** Según la NOM-021-SEMARNAT-2000, los suelos estudiados tanto a 1 como a 5 m, se clasificaron entre ligeramente ácidos y moderadamente ácidos. El pH de la capa de fermentación del suelo no mostró diferencias significativas entre suelos a 1 y 5 m, sin embargo, el pH del suelo si presentó mayor acidez a 5 m.

Según Vásquez (2005) y Rozas *et al.* (2011), el pH de suelos forestales, varían de extremadamente ácidos a moderadamente ácidos, resultado de la liberación de ácidos orgánicos y descomposición de la materia orgánica debido a la actividad microbiana, además del aporte de residuos orgánicos tanto de plantas como de animales. Influenciado también por la presencia de coníferas y latifoliadas. Por otro lado el pH se ve afectado por la susceptibilidad a erosión de la roca madre que lo subyace, en comparación de la amplitud



a 1 m de distancia donde la influencia de la cercanía del agua propicia lavados y arrastres de la materia orgánica del suelo disminuyendo la actividad microbiana y los valores del pH del mismo.

**Conductividad Eléctrica del suelo.** De acuerdo al análisis estadístico la CE del suelo posee una diferencia significativa entre amplitudes encontrando  $0.1 \text{ dSm}^{-1}$  para suelos a 1 m y  $0.2 \text{ dSm}^{-1}$  para suelos a 5 m. De acuerdo a la clasificación de los suelos por la NOM-021-SEMARNAT-2000, estos suelos no son salinos, sin embargo, su baja salinidad la generan el material parental y minerales del suelo. A 5 m de amplitud se mostró una mayor concentración de sales en el suelo, en comparación a los que se encontraron a 1 m de amplitud ya que hay mayor contacto con el agua del río por lo que se generan lavados y las sales no se acumulan.

**pH potencial del suelo y la capa de fermentación del suelo.** El pH de la capa de fermentación del suelo mostró una diferencia significativa entre amplitudes a 1 y 5 m del afluente con valores de 5.6 y 5.5 respectivamente. Al ser la capa de fermentación del suelo un resultado del proceso de la descomposición de la materia orgánica para la formación del suelo, presenta un medio ácido, sin embargo, los valores están ubicados dentro del rango de moderadamente ácidos. Los valores para la amplitud a 5 metros son más ácidos, por la presencia en mayor cantidad de coníferas y latifoliadas a esta amplitud, por lo que es más la materia orgánica que se encuentra en descomposición.

### **10.5 Pago de servicios ambientales, desarrollo de la idea del proyecto de secuestro de carbono.**

El objetivo general de esta tesis, plantea la estimación de líneas base de contenido de carbono orgánico actual para un futuro proyecto de pago por servicios ambientales de la zona de estudio en cuestión.

De acuerdo con la Dirección General de la Comisión Nacional Forestal, con fundamento en los artículos 25 párrafos primero, sexto y séptimo, 26 inciso A, 27 y 28 quinto y último párrafo de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos;



Además de la Ley de Planeación; Ley Federal de Presupuesto y Responsabilidad Hacendaria; Ley Federal de las Entidades Paraestatales; Ley Orgánica de la Administración Pública Federal; Plantean que la “línea base” es la información disponible o la construida como referencia para el funcionamiento del sistema de monitoreo de cada mecanismo local de Pago por Servicios Ambientales (PSA), la cual permite hacer comparaciones respecto a la evolución y efecto del mecanismo a lo largo del tiempo, al comparar por ejemplo, los valores de línea de base con los registrados en una etapa intermedia o al termino del convenio de colaboración del mecanismo.

En México la comisión encargada, de operar el Programa de Servicios Ambientales Hidrológicos (PSAH) desde el 2003, y el Programa para Desarrollar el Mercado de Servicios Ambientales por Captura de Carbono y los Derivados de la Biodiversidad para Fomentar el Establecimiento y Mejoramiento de Sistemas Agroforestales (PSA-CABSA) desde el año 2004, es CONAFOR.

Esta institución apoya cuatro modalidades de SA del bosque (Cuadro 13), pagando por periodos de cinco años renovables y promueve el desarrollo de mecanismos de pagos locales, municipales y estatales.

Cuadro 13. Servicios Ambientales implementados en México (CONAFOR, 2013).

Modalidad de Servicios Ambientales	Apoyo promedio otorgado pesos/ha/5 años
<b>C5.1 Hidrológicos</b>	2,108
<b>C5.2 Conservación de la biodiversidad</b>	2,313
<b>C5.3 Sistemas agroforestales con cultivos bajo sombra</b>	2,116
<b>C5.4 Desarrollo de la idea del proyecto de secuestro de carbono</b>	No se paga ejecución solo elaboración del estudio.



De acuerdo con este tipo de modalidades de servicios ambientales, esta investigación, es una buena opción para el apoyo económico, dentro de la modalidad “desarrollo de la idea de secuestro de carbono” ya que se estima la línea base del contenido actual de carbono en una zona ribereña.

Sin embargo, para la ejecución del proyecto de captura de carbono en una zona ribereña y como seguimiento a este proyecto con base en la cantidad actual de C en el sitio (línea base), se estimaría la cantidad de carbono a secuestrar por medio de planes de trabajo como reforestación y conservación del ambiente ribereño, evitando la tumba y rosa de la vegetación en las amplitudes de 1 y 5 m adyacentes al afluente, con monitoreo durante los 5 años del contrato.

De esta forma al ser una zona rivereña y por la importancia ecológica de este lugar las modalidades de pago abarcarían dos modalidades de PSA como:

- Hidrológicos
- Conservación de la biodiversidad

Cabe mencionar que este proyecto de línea base de captura de carbono para un futuro proyecto de PSA solo es válido para la zona de estudio en que se realizó el inventario, y está sujeto a los cambios ambientales extraordinarios que cambien o modifiquen el contenido de carbono en la misma.

Actualmente en México se debate la idea de PSA en captura de carbono dentro del mecanismo internacional REDD+, que formalmente se someterá a consulta hasta el año 2014, sin embargo el país ya recibió 33.8 mds de dos fondos del banco mundial, donde la CONAFOR encargada de la ejecución del proyecto, celebra la vocación de todas la áreas naturales protegidas y reservas naturales mexicanas para incorporarse al mecanismo.

En México la Comisión Intersecretarial de Cambio Climático (CICC) es la plataforma gubernamental integrada por 10 secretarías del sector federal encargada de coordinar la formulación de políticas de acción climática del país, entre las que se encuentra la Estrategia Nacional REDD+<sup>8</sup>. Adicionalmente la estrategia se ha nutrido con aportaciones de la Comisión Intersecretarial de Desarrollo Rural Sustentable (CIDRS).



Estas comisiones están definiendo las líneas rectoras para una Estrategia Nacional REDD+ que considera las metas de desarrollo nacional, de tal manera que el esfuerzo nacional REDD+ no sólo abarca al sector forestal, sino también el sector agropecuario, probando modelos para reducir la deforestación y degradación forestal basado en la alineación de políticas públicas dentro del marco de una estrategia de desarrollo rural sustentable.

Un marco normativo de reciente creación es la nueva Ley de Cambio Climático, la cual es de observancia en todo el territorio nacional y las zonas sobre las que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción y establece disposiciones para enfrentar los efectos adversos del cambio climático. Es reglamentaria de las disposiciones de la Constitución Política de México en materia de protección al ambiente, desarrollo sustentable, preservación y restauración del equilibrio ecológico.

Esta ley entró en vigor noventa días hábiles después de su publicación en el Diario Oficial de la Federación, lo cual se hizo efectivo en octubre del 2012. En esta ley el país asume el objetivo indicativo o meta aspiracional de reducir al año 2020 un 30% de emisiones con respecto a la línea de base; así como un cincuenta por ciento de reducción de emisiones al 2050 en relación con las emitidas en el año 2000. Las metas mencionadas podrán alcanzarse si se establece un régimen internacional que disponga de mecanismos de apoyo financiero y tecnológico por parte de países desarrollados hacia países en desarrollo entre los que se incluye nuestro país.

También se establece que las dependencias y entidades de la administración pública federal centralizada y paraestatal, las entidades federativas y los municipios deberán de implementar las acciones necesarias en mitigación y adaptación, de acuerdo a sus atribuciones y competencias para alcanzar las metas aspiracionales y plazos indicativos.

Este marco normativo da certeza a la construcción de una Estrategia Nacional REDD+ (ENAREDD+) en México (CONAFOR, 2012).

---

<sup>8</sup> REDD+ Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación de los bosques y la conservación de reservorios o almacenes de carbono, manejo sostenible de bosques e incremento de contenidos de carbono forestal.



Dentro de las políticas del mecanismo REDD+ (Ver anexo 11), esta investigación en colaboración con ejidatarios del municipio de Santa Isabel Chalma, podría ser una buena propuesta como PSA, para el desarrollo de captura de carbono en la zona ribereña del río Chopanac, en el Parque Nacional Iztaccihuatl Popocatépetl.

## 11. CONCLUSIONES

**Con base en los objetivos planteados, las conclusiones por altitud son:**

Las líneas base del contenido actual de C orgánico a través del gradiente altitudinal fueron en suelo  $99 \text{ Mg ha}^{-1}$ ; vegetación arbórea,  $22.8 \text{ Mg ha}^{-1}$ ; mantillo,  $8.1 \text{ Mg ha}^{-1}$ , capa de fermentación del suelo  $3.6 \text{ Mg ha}^{-1}$  y vegetación arbustiva,  $0.8 \text{ Mg ha}^{-1}$ .

El promedio de las líneas base de carbono orgánico de todos los compartimentos de la zona ribereña, a través del gradiente altitudinal fue de  $130 \text{ Mg ha}^{-1}$ , con un mínimo de  $100 \text{ Mg ha}^{-1}$  y un máximo de  $189 \text{ Mg ha}^{-1}$ .

De acuerdo al estado de conservación, las zonas forestales conservadas (3028-3224 m) tuvieron el mayor contenido de carbono, con una línea base  $161 \text{ Mg ha}^{-1}$ , las zonas forestales con ecoturismo (2667-2880 m) tuvieron una línea base de  $117.1 \text{ Mg ha}^{-1}$  y la zona urbana (2475 m) con  $109.1 \text{ Mg ha}^{-1}$ .

La cantidad de C orgánico almacenado en el suelo es 4 veces mayor que la encontrada en la vegetación arbórea confirmándose que la mayor cantidad de C orgánico almacenado se encuentra en el suelo con un promedio de  $99 \text{ Mg ha}^{-1}$ .

La segunda reserva importante de carbono orgánico está en la vegetación arbórea con un promedio de  $22.8 \text{ Mg ha}^{-1}$  a lo largo del gradiente altitudinal,



El carbono orgánico en los compartimentos del suelo mantillo, capa de fermentación almacenaron en promedio  $110.7 \text{ Mg ha}^{-1}$  y los reservorios de la vegetación solo  $23.6 \text{ Mg ha}^{-1}$ .

**Con base en los objetivos planteados, las conclusiones por amplitud son:**

La cantidad de C orgánico acumulado a 5 m de distancia del cauce, en suelo y mantillo ( $100.2 \text{ Mg ha}^{-1}$  y  $10.5 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) fueron mayores con respecto al acumulado a 1 m ( $92.3 \text{ Mg ha}^{-1}$  y  $5.8 \text{ Mg ha}^{-1}$ ), sin embargo estas no mostraron diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ).

En los compartimentos capa de fermentación del suelo y vegetación arbustiva, la mayor acumulación de C orgánico fue a 1m de distancia del cauce ( $3.8 \text{ Mg ha}^{-1}$  y  $0.9 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) con respecto al acumulado a 5 m ( $3.5 \text{ Mg ha}^{-1}$  y  $0.7 \text{ Mg ha}^{-1}$ ), sin embargo, tampoco existe diferencia significativa.

**De acuerdo al objetivo planteado de caracterizar algunos parámetros físicos y químicos del suelo y capa de fermentación las conclusiones son las siguientes:**

La investigación mostró que los suelos adyacentes al sistema Chopanac son de moderadamente a fuertemente ácidos a través del gradiente altitudinal y a ambas amplitudes; los niveles de N y P disponible fueron altos a 5 m y en los sitios ubicados a mayor altitud, además de que la relación C:N fue mayor a 1 m de distancia del afluyente y en sitios ubicados a menor altitud.



## REFERENCIAS

- Acosta M., J. D. Etchevers. 2005. Los Sumideros de Carbono: una alternativa para el cobro de servicios ambientales. Programa de Investigación en Servicios Ambientales. SAGARPA-INIFAP. Pp. 129-140.
- Acosta-Míreles, M., J. Vargas-Hernández, A. Velázquez-Martínez y J. Etchevers-Barra. 2002. Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de las relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia* 36: 725-736.
- Aguilar A. H., E. Ortiz M., B. Vilchez A. y R. Chazdon L. 2011. Biomasa sobre el suelo y carbono orgánico en el suelo en cuatro estadios de sucesión de bosques en la Península Osa, Costa Rica. *Revista forestal mesoamericana Kurú*. 9:22.
- Anaya L. Ma. L. 1962. La vegetación y los suelos de un transecto altitudinal del declive occidental del Iztaccihuatl (México). INIF. Bol. Técnico 65. México.
- Anaya L. Ma. L., Hernández S.R. y Madrigal S. X. 1980. La vegetación y los suelos de un transecto altitudinal del declive occidental del Iztaccihuatl (México). SARH, Subsecretaría Forestal y de la Fauna, INIF. Bol. Téc. No. 65. 80 p.
- Apps, M.J., W.A. Kurz, R.J. Luxmoore, L.O. Nilsson, R.A. Sedjo, R. Schmidt, L.G. Simpson y T.S. Vinson. 1993. Boreal Forests and Tundra. In: Wisniewski, J. y R.N. Sampson (Eds). *Terrestrial Biospheric Carbon Fluxes: Quantification and Sources of CO<sub>2</sub>*. Kluwer Academic Publishers. Holanda. p: 39-53.
- Arnaldos J. Navalon, X. Pastor, E. Planas, E. Zárata, L. 2004. Manual de ingeniería básica para la prevención y extinción de incendios forestales. Madrid, ES, ediciones mundi-prensa. 414 p.
- Arredondo S. F. M., Navar C. J. 2009. Estimación de factores de expansión de carbono en comunidades forestales templadas del norte de Durango. México. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente*. Vol. 15(2):155-163.
- Ávila G., F. Jiménez, J. Beer, M. Gómez, M. Ibrahim. 2001. Almacenamiento, fijación de carbono y valoración de servicios ambientales en sistemas agroforestales en Costa Rica. *Revista Agroforestería de las Américas* 8: 32-35.



- Ayala C. M. Y. 2011. Interacción Ecológica del sistema agua-suelo en ambientes ribereños del Parque Nacional Izta-Popo y zonas de influencia. Tesis de licenciatura. UNAM.
- Bárcenas P., Guadalupe M., Rosalba R. V., Rogelio J. A. R., Bertha J. F. y Amador H. S. 2008. Composición química y densidad básica relativa de la madera de dos especies arbustivas de encino blanco de la Sierra de Álvarez, SLP, México. Instituto de Ecología. Madera y bosques Vol. 14 (3): 81-94.
- Bauthus, J., Barthel, R. 1995. Mechanisms for carbon and nutrient release and retention in beech forest gaps. II. The role of soil microbial biomass. Plant and Soil 168-169:585- 592.
- Bendeck L. M. 2009. Origen y formación del Humus. Consultado el 12 de Noviembre del 2012 en la página <http://www.microbiologiaybiomasas.com/media/>
- Berger, T. W. H. Untersteiner H. Schume y G. Jost. 2008. Throughfall fluxes in a secondary spruce (*picea Abies*), a beech (*Fagus sylvatica*) and mixed spruce-beech stand. Forest Ecology and Management. 255:605-618.
- Beteta B. O. 2012. Caracterización y dinámicas de carbono y nitrógeno de suelos forestales, en Santa María Yavesia, Oaxaca. Tesis de licenciatura. Universidad de la Sierra Juárez.
- Brady, N. and R. Weil. 1999. The Nature and Properties of Soils. 12th Edition. Prentice Hall, Inc. New Jersey.
- Bravo A. 1998. Bosques. Seminario de manejo y conservación de recursos biológicos.
- Bremner, J. M. 1965. Total nitrogen. 1149-1178p In: C.A. Black (ed.), Methods of soil analysis. Part 2. Agronomy 9. American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin.
- Bren, L. J. 1993. "Riparian Zone, Streams, Floodplain Issues: A Review," Journal of Hydrology 150:277-299.
- Brown S. 2002. Medición del carbono en bosques: estatus actual y futuros retos. Contaminación Ambiental 116: 363-372.



- Brown, S. Lugo A. E. 1992. Aboveground biomass estimate for tropical moist forests of the Brazilian Amazon. In-Terciencia 17(1):8-18.
- Brown, S., Ch. Hall, W. Knabe, J. Raich, M. Trexler y P. Woomer. 1993. Tropical forest: their past, present and potential future role in the terrestrial carbon budget. Water, Air and Soil Pollution. 70: 71-94.
- Campbell R. 2005. Ecología microbiana, México Limusa, 268 p
- Cochran, V.L., Elliott, L.F., Lewis, C.F. 1989. Soil Biomasa and enzyme activity in subarctic agricultural and forest soils. Biology and Fertility Soils 7:283-288.
- Comunidades Europeas. 2009. El cambio climático. Comisión Europea. Dirección General de Medio Ambiente, Luxemburgo.
- CONABIO, 2013. Catálogo de recursos forestales maderables y no maderables. Árido, Tropical y Templado. CONACYT.
- CONAFOR. 2009. Restauración de ecosistemas forestales. Unidad de Comunicación Social. Coordinación de Conservación y Restauración de la Comisión Nacional Forestal. Jalisco México.
- CONAFOR. 2010. Consideraciones tecnológicas en la protección de madera. (Disponible en: [www.conafor.gob.mx](http://www.conafor.gob.mx)).
- CONAFOR, 2012. Bosques, cambio climático y REDD+ en México guía básica. Área de mercados y proyectos forestales de carbono. Coordinación general de producción y productividad. Comisión nacional forestal. México.
- CONAFOR, 2013. Programa para promover mecanismos locales de pago por servicios ambientales a través de fondos concurrentes. Lineamientos y Reglas. (disponible en línea) [www.cnf.gob.mx:8080/snif/portal/zonificacion](http://www.cnf.gob.mx:8080/snif/portal/zonificacion).
- CONAMP, 2013. (disponible en: [http://iztapopo.conanp.gob.mx/programa\\_de\\_manejo.php](http://iztapopo.conanp.gob.mx/programa_de_manejo.php)) acceso el 26 de febrero del 2013.
- Cruz G. 2006. Ecología del suelo, un enfoque hacia la nutrición mineral de plantas superiores. UNAM. FES-Z. pp. 12-13.
- Cruz G. y Jorge E. 2011. Contenidos de Carbono Orgánico de suelos someros en Pinares y Abetales de Áreas Protegidas de México. Agrociencia 45: 849-862.



- Davidson E.A., Stark J.M., Firestone M.K. 1990. Microbial production and consumption of nitrate in an annual grassland. *Ecology* 71:1968-1975
- Diaz-Ravina, M., M.J. Acea, T. Carballas. 1995. Seasonal changes in microbial biomass and nutrient flush in forest soils. *Biology and Fertility of Soils* 19:220-226.
- Dixon, R.K., S. Brown, R.A. Houghton, A.M. Solomon, M.C. Trexler y J. Wisniewski. 1994. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science* 263: 185-190.
- Domínguez R. I. y Aguilera N.H. 1982. Metodología de análisis físicos y químicos de suelos. UNAM, Facultad de Ciencias-Biología 34p.
- Elvira Q. J. R. 2009. Acelerando el mercado de bonos de carbono en México, impacto en la administración Obama y la regeneración del protocolo de Kioto. Conferencia Magistral: Una vista preliminar al programa especial de cambio climático. Institute of the Americas.
- Estrada P. 2001. Cambio Climático Global: causas y consecuencias. *Revista de información y análisis*. Num.16.
- FAO, 1993. Forest Resources Assessment 1990, Tropical Countries. FAO Forestry Paper 112. Rome.
- FAO, 2000. Sistemas de uso de la tierra en los trópicos húmedos y la emisión y secuestro de CO<sub>2</sub>. *World Soil Resources Reports* 88. Rome. 98 pp.
- FAO, 2001. Soil carbon sequestration for improved land management. *World soil reports* 96. Rome, 58 p.
- FAO, 2009: Situación de los bosques del mundo 2009. FAO, Roma, Italia.
- FAO, 2010: Evaluación de los recursos forestales mundiales. Informe principal. Roma, Italia.
- Ferraro, P., y A. Kiss. 2002. Direct payments to conserve biodiversity. *Science* 298: 1718-1719.
- Flaig, W., H. Beutelspacher, E. Rietz. 1975. Chemical composition and physical properties of humic substances. En: Gieseking, J.E. (ed.). *Soil Components*. Volume I. Organic Components. Springer-Verlag New York Inc., USA, Pp. 1-211.



- Foth, H. y L. Turk. 1984. Fundamentals of soil science. John Wiley and sons Inc. Ed. 7. New York.
- Franco S. 2009. Estimación de la Captura de Carbono en Zonas Forestales. Universidad Autónoma del Estado de México, 1 ed. México, pp. 38.
- Gallardo A., F. Covelo, L. Morillas, M. Delgado. 2009. Ciclo de nutrientes y procesos edáficos terrestres: especificidades del caso mediterráneo y sus implicaciones para las relaciones suelo-planta. Ecosistemas. Vol. 18(2):4-19.
- Giford, R. M. 1994. The global carbon cycle: A viewpoint on the missing sink. Aust. J. Plant Physiol. 21, 1-15.
- Goijberg-Rein, G. y A. Aguilar-Santelises. 1987. pH del suelo y necesidades de cal. pp.17-44. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Chapingo, México.
- González G. J. L., A. M. Rivero, S. A. Folgueras, J. M. Díaz, N. González y A. Pardo., 2005. Aplicación del protocolo de Kioto para Castillas y León. Consejo Económico y Social de Castilla y León. España. pp. 267-284. [disponible en] [www.cesycl.es/pdf/coleccionestudios/Pkioto.pdf](http://www.cesycl.es/pdf/coleccionestudios/Pkioto.pdf)
- González S. M. 2008. Estimación de la biomasa aérea y la captura de carbono en regeneración natural de *Pinus maximinoi* H. E. Moore, *Pinus ocarpa* var. *ochoterenai* Mtz. y *Quercus* sp. en el norte del estado de Chiapas, México. Centro Agronómico Tropical de investigación y enseñanza. Costa Rica. pp. 23-33.
- González, M. & García, D. 1995. Restauración de Ríos y Riberas. Fundación Conde del Valle de Salazar. Madrid.
- Google earth. 2012. (disponible en línea) [www.google.com.mx/intl/es/earth](http://www.google.com.mx/intl/es/earth).
- Greenpeace. 2010. (disponible en línea) [www.greenpeace.org/espana/es/news/2010](http://www.greenpeace.org/espana/es/news/2010).
- Hardner, J., and R. Rice. 2002. Rethinking green consumerism. Scientific American vol. 287:89-95.
- Harte, J, Kinzig, J., Ann P. 1993. Mutualism and competition between plants and decomposers: Implications for nutrimental location in ecosystems. American Naturalist vol. 141: 829-846.
- INEGI. 2012. (disponible en línea) [Antares.inegi.org.mx/análisis/red\\_hidro/SIATL/#](http://Antares.inegi.org.mx/análisis/red_hidro/SIATL/#).



- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 1995. Climate Change 1995. The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment. Cambridge University Press. Cambridge, Inglaterra.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2001. Cambio climático 2001: informe de síntesis. Una Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. 46p.
- Isaza, J. F. y R. D. Campos. 2007. Cambio climático: glaciaciones y calentamiento global. Bogotá: Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. 156 p.
- Jackson, W.R. 1993. Humic, fulvic and microbial balance: organic soil conditioning. Jackson Research Center.
- Jackson. M. L. 1964. Análisis químico de suelos. Traducción al español de J. Beltrán. Omega. Barcelona, España.
- Jungk A. 1993. Mobilization of different phosphate fractions in the rhizosphere. Plant and Soil. 155/56:91-94.
- Kern, J. S. y M. G. Johnson. 1993. Conservation tillage impacts on national soil and atmospheric carbon levels. Soil Sci. Soc. Am. J. 57, 200-210.
- Killingbeck, K, 1996. Nutrients in senesced leaves: keys to the search for potential resorption and resorption proficiency. Ecology, 77: 643-698.
- Lal Rattan. 1997. Residue management, conservation tillage and soil restoration for mitigating greenhouse effect by CO<sub>2</sub> – enrichment. Soil Till. Res. 43, 81-107.
- Lal Rattan. 2005. Forest soils and carbon sequestration. Forest Ecology and Management. Vol. 220:242-258.
- Lal Rattan. 2008. Carbon sequestration. Philosophical Transactions of the Royal Society. Biological Science vol. 363:815-830.
- Lal, R., D. J. Eckert, N. R. Fausey and W. M. Edwards. 1990. Conservation tillage in sustainable agriculture. In: C. A. Edwards, R. Lal, P. Madden, R. H. Miller and G. House (Editors), Sustainable Agriculture Systems. Soil and Water Conservation Society, Iowa, USA, pp. 203-225.
- Landell-Mills, N. y I. Porras. 2002. Markets for forest environmental services: silver bullet or fool's gold? Markets for forest environmental services and the poor,



emerging issues. International Institute for Environment and Development, London, UK.

- Ley Federal de la Reforma Agraria. 1983. Vigésima cuarta Edición. Editorial Porrúa.
- Linderman R. G. 1994. General summary. P. 1-26 In: Mycorrhizae and Plant Health. F.L. Pflieger and R.G. Linderman (Eds.), APS Press, St. Paul.
- Loguercio G. A. y Guillermo D. 2001. Ecuaciones de biomasa aérea, factores de expansión y de reducción de la Lengua *Nothofagus pumilio* (Poepp. et Endl.) Krasser, en el sur del Chubut, Argentina. Centro de investigación y extensión forestal Andino-Patagónico. Simposio Internacional medición y monitoreo de la captura de carbono en Ecosistemas forestales. Chile.
- López A. B. 2010. Variación del pH de agua de lluvia en bosques templados húmedos. Tesis de licenciatura. UNAM. FES-Z.
- Ludevid A.M. 1997. El Cambio Global en el Medio Ambiente 1ra Ed. España. Alfa omega grupo editor.
- Margalef R. 1992. Planeta Azul, Planeta Verde. Prensa Científica S.A.
- Martínez S. A. 2012. Actividad enzimática de suelos ribereños y su fertilidad en bosque del Parque Nacional Izta-Popo. Tesis de licenciatura. UNAM. FES-Z.
- Masera O. R., B. De Jong y I. Ricalde. 2000. Consolidación de la oficina mexicana para la mitigación de gases de efecto invernadero. Sector Forestal. Instituto de Ecología UNAM. México. 197 p.
- Masera O., M. J. Ordóñez y R. Dirzo. 1997. Carbon emissions from Mexican forests: current situation and long-term scenarios. *Climatic Change* 35:265-295.
- Masera O., M. R. Bellon y G. W. Segura. 1995. Forest management options for sequestering carbon in México. *Biomass & Bioenergy* 8(5): 357-367.
- McNeil Ben I., Matear Richard J., Key Robert M., Bullister John L. y Jorge L. Sarmiento. 2003. Anthropogenic CO<sub>2</sub> Uptake by the Ocean Based on the Global Chlorofluorocarbon. *Science* Vol. 299 no. 5604 pp. 235-239.
- Montoya G., L. Soto, Ben de Jong, K. Nelson, P. Farías, Pajal Yakac Tic, J. Taylor y R. Tipper. 1995. Desarrollo Forestal Sustentable: Captura de carbono en las zonas



Tzeltal y Tojolabal del Estado de Chiapas. Instituto Nacional de Ecología, cuadernos de trabajo 4. México, D.F.

- Morales M. y J. B. Fernández. 2006. Aspectos relevantes de la interacción entre la vegetación de ribera, la hidráulica y la morfológica de causas. Departamento de Ingeniería Hidráulica. Universidad Politécnica de Valencia. pp.14.
- Muhammad. 2007. Almacenamiento de carbono en el suelo y la biomasa arbórea en sistemas de usos de la tierra en paisajes ganaderos de Colombia, Costa Rica y Nicaragua. Agroforestería en las Américas No. 45 2007
- Muñoz C. 2005. Bienes y servicios ambientales en México: caracterización preliminar y sinergias entre protección ambiental, desarrollo del mercado y estrategia comercial. Medio ambiente y desarrollo. División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos.
- Najera L. J. A., Antonio Z. V., Jorge M. G. y José G. L. 2005. Propiedades físicas y mecánicas de la madera en *Quercus laeta liemb.* del salto Durango. Universidad Autónoma Indígena de México. *Ra Ximhai* Vol. 1(003):559-576.
- Niesten E. y R. Rice. 2004. Sustainable forest management and conservation incentive agreements. *International Forestry Review* 6:56-60.
- Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000. Establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. 2da sección. SEMARNAT. DOF-2002.
- Núñez J. 2000. Fundamentos de edafología. 2ª ed. San José, CR, EUNED. 185 p.
- Odum P. 1973. Ecología. Interamericana 3ra edición.
- ONU. 1992. Protocolo de Kioto de la convención marco de las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático. (disponible en línea)  
<http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan>.
- Ordoñez D. J.A.B. 1999. Captura de Carbono en un Bosque Templado: El caso de San Juan Nuevo, Michoacán. Instituto Nacional de Ecología-SEMARNAP. México.
- Ordoñez J.A.B., y O. Masera. 2001. Captura de carbono ante el cambio climático. *Madera y Bosques*. 7: 3-12.



- Ortiz, S. C. A. 2010. Edafología. Universidad Autónoma Chapingo. 8va ed. Departamento de suelos. México.
- Pape Th. and D. Legger. 1994. Manual for Soil Description and Classification. Department of Soil Science and Geology. Wageningen Agricultural University.
- Paul, E. A. Clark, F. E. 1989. Soil microbiology and biochemistry. Academic Press, San Diego. Pausas, J. G. 1997. Litter fall and litter decomposition in Pinus sylvestris forest of the eastern Pyrenees. Journal of Vegetation Science 8:643-650.
- Percy K. E., R. Jandl, J. P. Hall, y M. Lavigne. 2003. El papel de los bosques en el ciclo, la captura y el almacenamiento de carbono. Los bosques y el ciclo de carbono a nivel mundial fuentes y sumideros. Nº 1.
- Perdomo C. y Mónica B. 1999. Nitrógeno. Cátedra de Fertilidad. Facultad de Agronomía, Universidad de la Republica. Montevideo, Uruguay. Pp. 1-74.
- Pérez B. P., G. Ouro, A. Merino y F. Macías. 1998. “Descomposición de Materia Orgánica, Biomasa Microbiana y Emisión de CO<sub>2</sub> en un Suelo Forestal bajo diferentes manejos Selvícolas”. Edafología. 5: 83,93.
- Plaster E. J. 2000. La ciencia del suelo y su manejo. Ed. Paraninfo. Madrid. 419 p
- Pritchett W. 1991. Suelos forestales, propiedades, conservación y mejoramiento. Editorial LIMUSA-grupo noriega editores. México
- Rainer B., Guenther S., Luca M. y Eric V. R. 2010. Carbon concentrations and stocks in forest soils of Europe. Forest Ecology and Management. 260: 262-277.
- Reicosky D. C. 2002. Long - Term Effect of Moldboard Plowing on Tillage - Induced CO<sub>2</sub> Loss, in J. M. Kimble, R. Lai and R. F. Follet: Agricultural Practices and Polices for Carbon Sequestration in Soil. Lewis Publishers. Papers form symposium held July 1999 at Ohio State University, Columbus, Ohio, 87-96 p.
- Richards, L. A. 1990. Diagnostico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América, Limusa, México D.F.
- Robert M. 2002. Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. Informe sobre recursos mundiales de suelos. FAO.



- Rocha A. y M. Ramírez, 2009. Producción y descomposición de hojarasca en diferentes condiciones sucesionales del bosque de pino-encino en Chiapas, México. Boletín de la sociedad botánica de México, 84:1-12.
- Rojas G. F. 2004. Contenido y captura potencial de Carbono en el bosque de *Pinus hartwegii* del parque nacional la Malinche: Tlaxcala-Puebla. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias, UNAM.
- Rozas S. H. R., Hernán E.E. y Hernán P.A. 2011. Niveles de Carbono Orgánico y pH en suelos Agrícolas de las Regiones Pampeana y Extra pampeana Argentina. Ciencias del Suelo (Argentina) 29(1): 29-37.
- Ruiz M. 2007. Los servicios ambientales de los bosques. ECOSISTEMAS, revista científica y técnica de ecología y medio ambiente 16 (3): 81-91.
- Ruiz. R. 2011. Los bosques y sus efectos como sumideros de carbono. CIFOR. INIA/IUGFS.
- Rzedowski J. 2005. Vegetación de México. CONABIO. (disponible en línea).
- Sadzawka A., A. Carrasco. 1985. El pH del suelo. En TOSSO T., J (ed.). Suelos volcánicos de Chile, Santiago, Chile. Pp. 337-348.
- Sadzawka R. A., Mario P. P., Manuel I. M., José M. P. y Juan P. F. 1995. Características químicas de suelos forestales Chilenos. Centro Regional de investigación La Platina (INIA), Santiago, Chile. (Departamento de Silvicultura, Facultad de Ciencia Agrícolas y Forestales, Universidad de Chile, Casilla 1004, Santiago, Chile. Vol. 16(1):9-28.
- Salazar J. A. H. y R. Meraz A. 2002. Caracterización tecnológica de algunas especies de coníferas de la región de El Salto P.N. Durango. Proyecto CONAFOR-2002-C01-6069.
- Sanzano A. 2013. El fósforo del suelo. Cátedra de Edafología. Facultad de Agronomía y Zootecnia. UNIT. Tucumán. Argentina (consultado en [www.edafologia.com.ar](http://www.edafologia.com.ar))
- Schilling K. E., Jason A. P., E. Arthur B. III, Peter J., Richard C. Schulz, Thomas M. I. 2009. Vertical distribution of total carbon, nitrogen and phosphorus in riparian soils of Walnut Creek, southern Iowa. Catena. Vol. 77:266-273



- SEMARNAT, 2006. Programa de pago por servicios ambientales. Gerencia de servicios ambientales del bosque CONAFOR.
- Sepúlveda V., J. A. Velasco y D. A. de la Rosa. 2005. Suelos contaminados por metales pesados y metaloides: muestreo y alternativas para su remediación. INE-SEMARNAT.
- Sethuram S., B. Suzanne, E. K. Steven, T. David y W. Derek. 2007. Ecosystem services from riparian areas: A brief summary of the literature. Scientific Advisory Committee. Illinois River Coordinator Council. USA. pp. 2-7.
- Silva, A. 1998. La materia orgánica del suelo. Montevideo, Facultad de Agronomía. 46p.
- Tietema A., W. Wessel. 1992. Gross nitrogen transformations in the organic layer of acid forest ecosystems subjected to increased atmospheric nitrogen input. *Soil Biology and Biochemistry* 24:943–950.
- Vásquez, M. E. 2005. Calcio y Magnesio, acidez y alcalinidad del suelo. En: Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos (ed. HE Echeverría y FO García). Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina. Pp. 161-188.
- Velásquez, A. 1992. Landscape ecology of Tláloc and Pelado volcanoes, México. With special reference to the colcano rabbit (*Romerolagus diazi*), its habitat, ecology and conservation. *ITC Journal* 6(3):213-227.
- Viñegla, B., García R. R., Liétor J., Ochoa V., Carreira, J. 2006. Soil phosphorus availability and transformation rates in relictic pinsapo fir forests from Southern Spain. *Biogeochemistry* 78:151-172.
- Vitousek P. M., J. D. Aber, R.W. Howarth, G.E. Likens, P. A. Matson, D.W. Schindler, W. H. Schlesinger, and D.G. Tilman. 1997. Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences. *Ecological Applications* 7:737–750.
- Wardle D. A. 1998. Control of temporal variability of the soil microbial biomass: a global scale synthesis. *Soil Biology and Biochemistry* 30:1627-1637.



- Wilson R. W., F. J. Millero, J. R. Taylor, P. J. Walsh, V. Christensen, S. Jennings y M. Grösel. 2009. "Contribución del pescado a la Marina de carbono inorgánico del ciclo". *Ciencias*. Vol. 323 (5912): 359-362.
- Woomer P. L., C. A. Palm, J. N. Qureshi, J. Kotto-Same. 1998. Carbon sequestration and organic resource management in African smallholder agriculture. In: Lal, R., Kimble, J. M., Follett, R. F., Stewart, B. A. (Eds.), *Management of Carbon Sequestration in Soils, Advances in Soil Science (series)*. CRC Press, Florida, pp. 158-173.
- Wunder, S. 2006. Pagos por servicios ambientales: Principios básicos esenciales. Centro Internacional de Investigación Forestal (CIFOR) pp. 23.



## Anexo 1. Técnicas de análisis de suelos.

### 1.1 Conductividad Eléctrica (Richards, 1990).

Reactivos:

- Agua destilada.

Procedimiento:

- Se colocan 10 g de suelo en un vaso de precipitado de polipropileno de 100 mL.
- Se añaden 50 mL de agua (si se utiliza la muestra en la que se determinó el pH, adicionar 30 mL )
- Se agita la suspensión y se deja reposar por 24 h.
- Se mide la conductividad eléctrica del sobrenadante.
- Se enjuaga la celda tres veces con agua destilada.
- Se enjuaga con la solución problema, dos o tres veces.
- Se toma la temperatura de la solución problema.
- Las lecturas se corrigen por un factor de temperatura y se expresan de acuerdo con las instrucciones del fabricante.
- Se enjuaga con agua destilada varias veces la celda. En ésta se coloca una solución de KCl 0.01 N a 25 ° C y se realiza la lectura, se efectúan tres o cuatro lecturas y se obtiene el promedio para calcular la constante de la celda.

Cálculos:

- ✓ Cálculo de la constante de la celda:

$$K = \frac{1.4118}{C_{Cl}}$$

- ✓ K = constante de la celda a 25°C
- ✓ 1.4118 mmho cm<sup>-1</sup> = conductividad eléctrica específica de KCl 0.01 N a 25°C
- ✓ C<sub>KCl</sub> = conductividad de la disolución en mmho cm<sup>-1</sup>

$$CE = \frac{C_{prob} \times k \times Ft}{1000}$$

- ✓ CE = Conductividad eléctrica, dS m<sup>-1</sup>, a temperatura ambiente. Si mmho cm<sup>-1</sup>=dS m<sup>-1</sup>
- ✓ C<sub>prob</sub>= conductividad de la muestra problema en µmhos
- ✓ Ft = factor de corrección de temperatura tabulada

1000= factor para convertir de µmho a moho



### 1.2 pH relación 1:2, con H<sub>2</sub>O (Jackson, 1964).

#### Reactivos

- ✚ Agua destilada.
- ✚ Soluciones amortiguadoras con pH 4.0, 7.0 y 9.0 ó 10.0.

#### Procedimiento

- Se colocan 10 g de suelo en un vaso de precipitado de 100 mL, se añaden 20 mL de agua, lo cual da una relación suelo/solución 1:2.
- Se agita manualmente durante 1 minuto y se deja reposar por 10 minutos (La operación se repite dos veces.
- Se agita perfectamente la suspensión del suelo antes de efectuar la lectura correspondiente de pH.
- Se calibra el instrumento con las soluciones amortiguadoras, teniendo cuidado de leer las muestras problema en el intervalo de pH correspondiente.

### 1.3 pH relación 1:2, con KCl 1N (Domínguez, 1982)

#### Reactivos

- ✚ Solución de KCl 1N.
- ✚ Soluciones amortiguadoras con pH 4.0, 7.0 y 9.0 ó 10.0.

#### Procedimiento

- Se colocan 10 g de suelo en un vaso de precipitado de 100 mL, se añaden 20 mL de agua, lo cual da una relación suelo/solución 1:2.
- Se agita manualmente durante 1 minuto y se deja reposar por 10 minutos (La operación se repite dos veces.
- Se agita perfectamente la suspensión del suelo antes de efectuar la lectura correspondiente de pH.
- Se calibra el instrumento con las soluciones amortiguadoras, teniendo cuidado de leer las muestras problema en el intervalo de pH correspondiente.



#### 1.4 Determinación de materia orgánica, método de Walkley & Black (Jackson, 1964).

Reactivos:

- ✚ Dicromato de potasio 1.0 N
- ✚ Sulfato ferroso 0.5 N
- ✚ Indicador de difenilamina
- ✚ Ácido sulfúrico concentrado
- ✚ Ácido fosfórico concentrado
- ✚ Fluoruro de sodio

Procedimiento:

- Se pesan 0.5 g de suelo (en este caso se pesaron 0.1 g de suelo por el alto contenido de materia orgánica) tamizado en una malla de 2 mm, se coloca en un matraz Erlenmeyer de 250 mL, se añaden 5 mL de Dicromato de potasio 1N y se agita.
- Se añaden 10 mL de ácido sulfúrico concentrado y se agita durante 1 minuto, se deja reposar por 30 minutos o hasta que se haya enfriado.
- Se añaden 100 mL de agua destilada, se agita y se deja enfriar.
- Se agregan 5 mL de ácido fosfórico concentrado, 0.05 g de fluoruro de sodio y de 10 a 15 gotas de indicador de difenilamina.
- Se titula con sulfato ferroso 0.5 N
- Para hacer la valoración de la solución de sulfato ferroso, se corre una prueba en blanco (todos los reactivos sin suelo) y se obtiene el valor de B de la siguiente ecuación. Con el empleo de la siguiente fórmula no es necesario calcular específicamente la normalidad.

Cálculos:

$$\% \text{ M.O.} = 10 (1 - M/B) \times 1.34$$

- ✓ M= mL de sulfato ferroso gastados en la titulación
- ✓ B= mL de sulfato ferroso gastados en el blanco
- ✓ El factor 1.34 se deduce de la siguiente forma:

$$(1.0 \text{ N}) \times 12/4000 \times 1.72/0.77 \times 100/0.5 = 1.34$$

$$(1.0 \text{ N}) \times 12/4000 \times 1.72/0.77 \times 100/0.1 = 6.70 \text{ (en este caso)}$$

- ✓ 1.0 = normalidad del  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$
- ✓ 12/4000 = peso miliequivalentes de carbono.
- ✓ 1.72 = factor de transformación de carbono en materia orgánica (MO).
- ✓ 0.77 = factor de recuperación de 77% determinado por Walkley.
- ✓ 0.5 = peso de muestra (en este caso 0.1 g).



### 1.5 Determinación de P extractable, Bray y Kurtz 1 modificado (Bray and Kurtz, 1945) (Jackson, 1964).

#### Reactivos:

- ✚ Solución extractante Bray y Kurtz 1 (fluoruro de amonio 0.03 N en ácido clorhídrico 0.025 N. se disuelve 1.11 g de NH<sub>4</sub>F en agua. Se diluye a 900 mL y se adicionan 2 mL de HCl concentrado. se afora a 1 L).
- ✚ Ácido sulfúrico 14 N.
- ✚ Tartrato doble de antimonio y potasio al 0.5% (p/v).
- ✚ Solución stock de molibdato de amonio.
- ✚ Reactivo mezclado (1.5 g L-ácido ascórbico en 100 mL de solución stock).
- ✚ Estándar de P de 200 ppm.
- ✚ Estándar de P de 2.5 ppm.

#### Procedimiento:

- Pesar 0.5 g de suelo y se colocan en un matraz Erlenmeyer de 50 mL.
- Se adicionan 25 mL de la solución extractante y se agita por 5 minutos en un agitador de acción recíproca a 180 rpm. Colocando los matraces en posición vertical (Se corren muestras blanco con los mismos reactivos sin suelo).
- El extracto se filtra en papel whatman del número 42.
- Se toma una alícuota de 2 a 40 mL del extracto, dependiendo de la concentración de P en solución (alícuotas de 5 a 10 mL son en general adecuados para suelos bajos y medios en P) y se coloca en un matraz aforado de 50 mL.
- Se adiciona agua hasta completar aproximadamente 40 mL. Se agregan 5 mL del reactivo mezclado, se agitan y completan a volumen. Se esperan 30 minutos y se lee en un espectrofotómetro a 882 nm.
- Paralelamente se prepara una curva de calibración de fósforo como se indica a continuación:

Solución P 5 ppm <sup>a</sup>	Solución extractante <sup>b</sup> mL	Agua <sup>c</sup>	Ácido ascórbico	Conc. De P ppm
0	5 ó 10	40	5	0
1	5 ó 10	40	5	0.10
2	5 ó 10	40	5	0.20
3	5 ó 10	40	5	0.30
4	5 ó 10	40	5	0.40
5	5 ó 10	40	5	0.50
6	5 ó 10	40	5	0.60

<sup>a</sup> en matraz aforado de 50 mL

<sup>b</sup> según la alícuota que se tome

<sup>c</sup> la necesaria para tener aproximadamente 40 mL



Cálculos:

$$P \text{ (mg/kg)} = \text{ppm en CC} \times D_m \times D_v$$

Dónde:

ppm CC = partes por millón en la curva de calibración.

$D_m$  = dilución de masa (volumen de extractante/g de muestra).

$D_v$  = dilución de volumen (aforo/alícuota).

### 1.6 Nitrógeno total, método semimicro-kjeldahl, no incluye nitratos (Bremner, 1965).

Reactivos:

- ✚ Ácido sulfúrico concentrado:  $H_2SO_4$
- ✚ Mezcla de indicadores. (Se disuelven 0.099 g de verde de bromocresol y 0.066 g de rojo de metilo ( $C_{15}H_{15}N_3O_2$ ) en 100 mL de alcohol etílico a 95%.
- ✚ Ácido bórico con indicador. ( $H_3BO_3$  en agua más mezcla de indicadores), (si la coloración de la solución es verde antes de pH 5.0, hay que preparar nuevamente la solución).
- ✚ Mezcla de catalizadores ( $K_2SO_4$  100 g de  $CuSO_4 \cdot 5H_2O$  y 10 g de selenio metálico).
- ✚ Hidróxido de sodio 10 N (El hidróxido de sodio libre de  $CO_2$  debe protegerse del  $CO_2$  atmosférico, para lo cual debe mantenerse perfectamente tapado).

Procedimiento:

- Digestión. Se pesan 1, 0.5 o 0.25 g de muestra para suelos con 2, 4 u 8% de materia orgánica, respectivamente; en suelos arenosos se sugiere pesar 0.5 g para evitar que la muestra se proyecte durante la digestión.
- Se adicionan 4 mL de ácidos sulfúrico concentrado. Se deja en reposo toda la noche (Simultáneamente se corren blancos de reactivos).
- Se agrega 1.1 g de mezcla de catalizadores y se calienta hasta que el digestado se torne claro ( $260^\circ C$ ).
- Se bulle la muestra 1 h a partir de ese momento. La temperatura en esta fase se debe regular de modo que los vapores de ácido sulfúrico se condensen en el interior del cuello del tubo de digestión.
- Completada la etapa anterior, se deja enfriar el tubo y se agrega suficiente agua para colocar la suspensión, mediante agitación, el digestado (4 a 5 mL son suficientes).
- Se deja decantar las partículas de sílice con lo que se evita la precipitación de cristales de sulfato de amonio.



- Destilación. Se transfiere el contenido al bulbo de la cámara de destilación del aparato (Es conveniente lavar el matraz de digestión dos o tres veces con pequeñas porciones de agua, adicionarlas junto con la muestra a la cámara).
- Se coloca en el tubo de salida del aparato de digestión un matraz Erlenmeyer de 125mL con 10 mL de la solución de (H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>) ácido bórico con indicador.
- Se adicionan 10 mL de NaOH 10 N al bulbo de destilación.
- Se conecta el flujo de vapor y se inicia la destilación. Se destilan aproximadamente 75 mL y se lava el condensador.
- El nitrógeno amoniacal se determina por titulación con ácido 0.05 N. Se sugiere utilizar una microbureta de 10 mL con graduaciones de 0.02 mL o un titulador automático.
- El punto de equivalencia de la titulación ocurre cuando la solución vira de verde a rosado (titular los blancos y tomar como referencia este vire).

Cálculos:

- La concentración de N en  $\text{cmol kg}^{-1}$ , en la muestra se determina según la siguiente fórmula:

$$N (\text{cmol kg}^{-1}) = \frac{(V_{\text{muestra}} - V_{\text{blanco}})N \text{ ácido} \times 14}{\text{peso muestra} \times 10} \times 71.428$$

Dónde:

- $V_{\text{muestra}}$  = volumen de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> para titular la muestra (mL)
- $V_{\text{blanco}}$  = volumen de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> titular el blanco (mL)
- N = normalidad exacta del H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>
- 14 = peso mili-equivalente del N (mg).
- 1/10 = factor para convertir a porcentaje (100/1000)
- 71.428 factor para convertir de porcentaje a  $\text{cmol kg}^{-1}$ .
- Peso de muestra en gramos



### 1.7 Densidad Aparente. Método del cilindro (Castillo, 2007).

#### Procedimiento:

- Se mide la altura y el diámetro interno de los cilindros metálicos para poder calcular su volumen.
- Se introducen los cilindros en el suelo ayudado con un martillo que debe colocarse en la parte superior del cilindro y golpear sobre él con el martillo, hasta introducir completamente los cilindros en el suelo. Los filos externos del cilindro deben ser biselados o cortantes.
- Extraer los cilindros con las muestras de suelo contenidas en él. Con la espátula o cuchillo cortar en capas delgadas el suelo sobrante de los extremos hasta llegar al nivel de los bordes del cilindro metálico biselado.
- Transferir las muestras de suelo a bolsas de plástico, y amarrar los extremos con ligas.
- Pesar las muestras.
- Llevar las muestras a una estufa (marca FELISA), para secarlas a 105 ° C.
- Luego de 24 horas, extraer las muestras secas y proceder a pesarlas.
- Registrar los datos en el cuadro respectivo.

#### Cálculos:

La densidad aparente del suelo en  $g\text{ cm}^{-3}$  se determinó con la siguiente fórmula:

$$DA(g\text{cm}^{-3}) = \frac{\text{peso del cilindro con suelo (seco)} - \text{peso del cilindro}}{\text{peso total (humedo)}}$$



**Anexo 2.** Especies vegetales encontradas a lo largo de la zona ribereña del afluente Chopanac.

Cuadro 12. Nombre de la familia y especie de las comunidades vegetales encontradas a lo largo de las zonas ribereñas estudiadas así como sus fotografías.

No	Familias y Especies vegetales
1	Asteraceae <i>Eupatorium</i>
2	Asteraceae <i>Senecio angulifolius</i>
3	Helecho <i>Phanerophlebia</i>
4	Rosaceae
5	ND
6	Solanaceae <i>Cestrum</i>
7	Asteraceae
8	ND
9	Asteraceae <i>Cirsium</i>
10	ND
11	ND
12	Polygonaceae <i>Rumex</i>
13	Adiantaceae <i>Adiantum</i>
14	Asteraceae <i>tagetes</i>
15	Plantaginaceae <i>Plantago</i>
16	Fabaceae <i>Lupinus</i>
17	Rosaceae <i>Rubus</i>
18	ND
19	ND
20	Onagraceae <i>Fuchsia microphylla</i>
21	ND
22	Commelinaceae <i>Commelina</i>
23	ND
24	Hongo no determinado

\*Especies determinadas con la ayuda del biólogo Carmelo Cortez García integrante del equipo de trabajo del herbario de la FES-Z.







**Anexo 3.** Sistema SAS  
Procedimiento CORR  
Estadísticos simples

Variable	N	Media	Dev tip	Suma	Mínimo	Máximo
Altit	93	2812	276.24	261492	2475	3224
Ampli	93	3.19	2.00	297	1.00	5.00
tCsu	83	99.73	29.64	8278	34.10	167.30
tCcf	58	3.45	2.70	200.20	0.60	13.30
tCmant	58	7.69	9.60	446.20	0.90	61.40
ppmPsu	86	0.20	0.07	17.39	0.06	0.31
ppmPcf	93	0.23	0.07	21.66	0.07	0.33
NSuelo	85	0.46	0.14	38.79	0.19	0.77
Ncf	88	0.58	0.20	51.37	0.28	1.35
pHsuelo	83	5.89	0.57	489.47	5.00	7.09
pHKClisu	80	5.53	0.31	442.03	4.79	6.68
CEsu	83	0.13	0.18	10.96	0.03	0.85
pHcf	89	6.05	0.65	538.54	4.88	7.30
pHKClcf	86	5.57	0.29	479.01	4.96	6.29
CEcf	89	0.10	0.06	9.10	0.05	0.35
tCa	18	0.91	1.08	16.30	0.10	4.30
tCarbol	22	24.51	15.64	539.20	5.10	51.00
CNsuelo	75	14.07	3.20	1056	7.70	23.90
CNCF	83	18.57	4.30	1542	7.00	34.50

**Anexo 4.** Resumen del análisis de varianza de los contenidos de carbono en diferentes compartimientos de sistemas ribereños en bosques templados.

Variable	G. L.	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-calc	Pr > F
COS	6	20437.3	3406.2	5.02	0.0002
Ccf	6	264.1	44.02	14.74	<.0001
Cm	6	1478.3	246.4	3.33	0.0077
Cva	5	11.855	2.371	3.51	0.0348
CvA	5	4247.874	849.574	15.27	<.0001

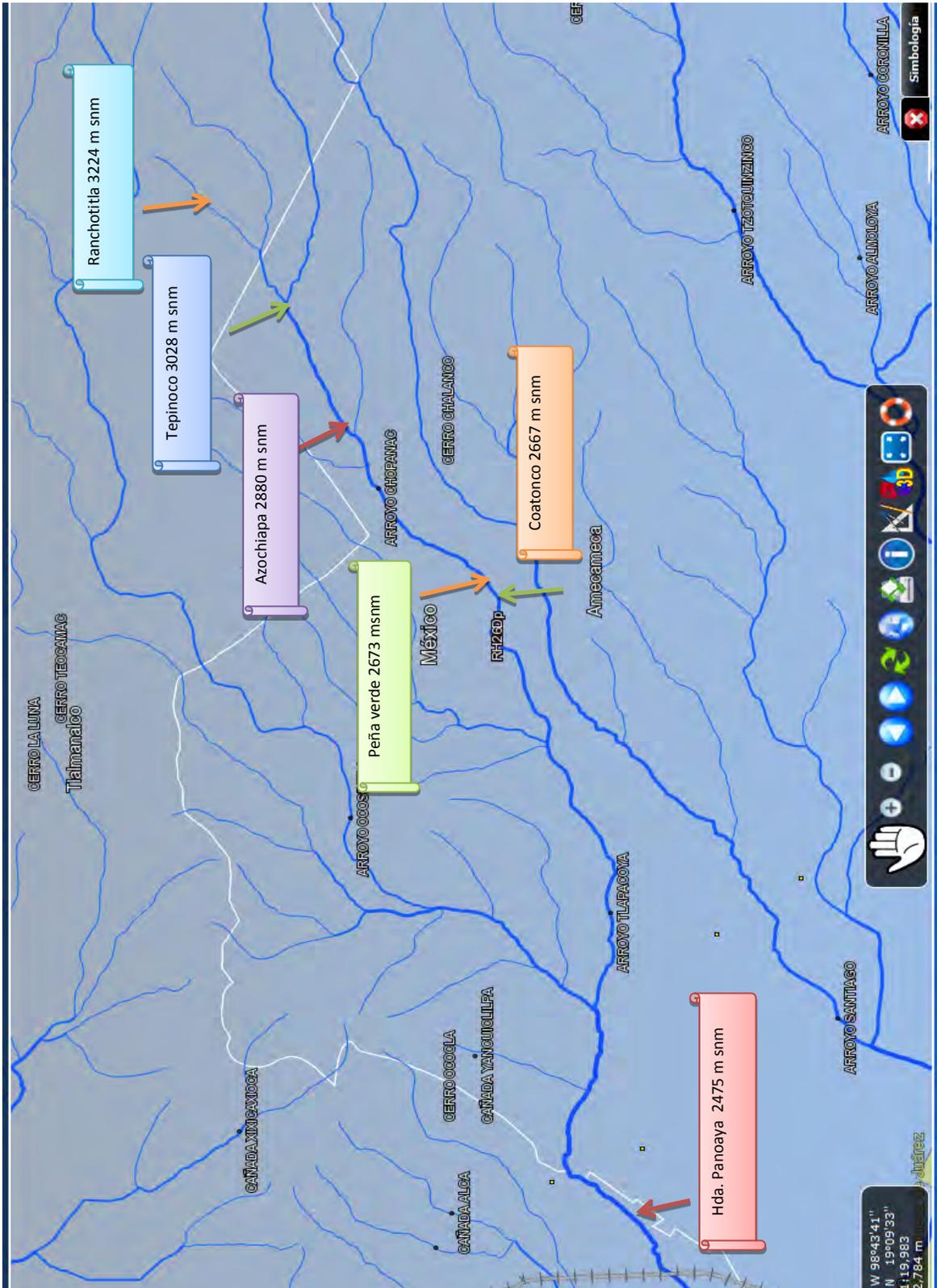


**Anexo 5.** Resumen del análisis de varianza de las propiedades físicas y químicas del suelo y capa de fermentación en diferentes compartimientos de sistemas ribereños en bosques templados.

Fuente	G. L.	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-calc	Pr > F
Fósforo en suelo	6	0.316	0.053	47.34	<.0001
Fósforo en Capa de Fermentación	6	0.382	0.064	80.22	<.0001
Nitrógeno suelo	6	0.505	0.084	5.97	<.0001
Nitrógeno Capa de Fermentación	6	1.008	0.168	5.27	0.0001
pH Suelo	6	11.261	1.877	9.50	<.0001
pH Capa de Fermentación	6	19.273	3.212	14.97	<.0001
CE Suelo	6	1.307	0.218	12.64	<.0001
CE Capa de Fermentación	6	0.070	0.012	3.34	0.0054
pH (KCl) Suelo	6	3.786	0.631	12.60	<.0001
pH (KCl) Capa de Fermentación	6	3.558	0.593	13.14	<.0001
C:N en suelo	6	272.370	45.395	6.34	<.0001
C:N en Capa de Fermentación	6	289.226	48.204	2.98	0.0114



Anexo 6. Red hidrográfica de alimentación del afluente Chopanac.





Anexo 7. Álbum fotográfico.



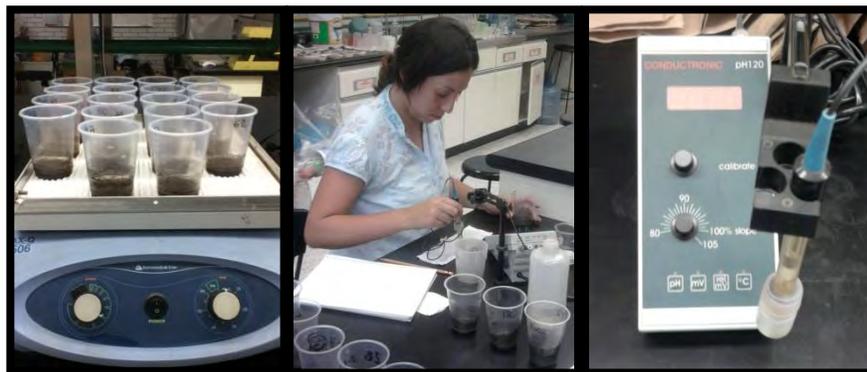
Manejo de muestras de mantillo.



Muestras de Capa de fermentación del suelo.



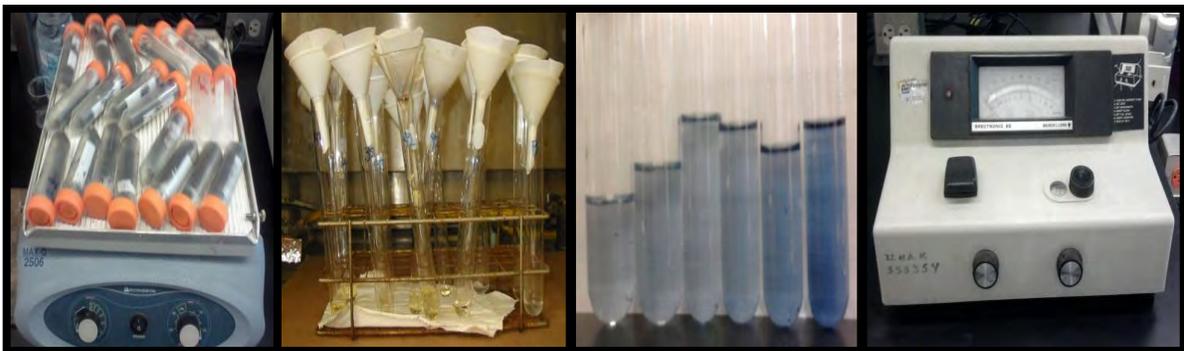
Proceso de muestras de vegetación arbustiva.



Determinación de pH y conductividad eléctrica.



Determinación de materia orgánica del suelo.



Determinación de Fósforo extractable.



Determinación de Nitrógeno total.



---

## **Anexo 8. Mecanismo de pago por servicios ambientales REDD+ en México**

### **Negociaciones internacionales sobre bosques y cambio climático**

Durante la COP 13, realizada en Bali en 2007, se estableció el “Plan de acción de Bali” en el que se recomienda acelerar las tareas de limitación de la emisión de GEI en la atmósfera. En esta convención se adoptó un plan ambicioso para llegar a un acuerdo global a largo plazo, que posiblemente sustituirá el Protocolo de Kioto cuando finalice en 2012. La convención reconoció la reducción de emisiones por deforestación y degradación de los bosques (REDD) como un mecanismo válido en la lucha contra el cambio climático.

Dentro del Grupo de Trabajo Especial sobre la cooperación a largo plazo en el marco de la Convención (GTE-CLP) el cual se reunió por primera vez en marzo de 2008, se han discutido hasta la fecha una amplia variedad de temas, según lo establecido en el Plan de acción de Bali el GTE-CLP, basa sus negociaciones en cinco aspectos principales, en donde el tema REDD se trata en el apartado 2:

1. Visión de largo plazo
2. Mitigación
3. Adaptación
4. Tecnología
5. Financiamiento

En Poznan se concretó la creación del Fondo de Adaptación del Protocolo de Kioto y se avanzó en las estrategias mundiales para afrontar los temas de adaptación, financiación, tecnología, manejo de desastres y Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación Forestal (REDD).

En marzo del 2009 se reconoció la función de los bosques en la conservación y las reservas de carbono agregando un signo “+” a REDD, que significa la conservación de los stocks de carbono, el manejo forestal sostenible y el mejoramiento de las reservas de carbono.

Por último, en la COP 16 que se llevó a cabo en 2010, se logró un acuerdo de reducción de emisiones para después de 2012, sin embargo, sí logró algunos acuerdos importantes conocidos como acuerdos de Cancún, entre los que destacan:



- Dedicar mayores esfuerzos para mitigar el cambio climático y buscar una meta global para 2011 para reducir sustancialmente las emisiones globales para 2050.
- Implementar acciones en adaptación, para lo cual se estableció un comité y se definió qué países en desarrollo recibirán mayor financiamiento, tecnología y capacitación.
- Confirmar los compromisos bajo el Acuerdo de Copenhague de 30 billones de dólares para financiamiento a corto plazo y 100 billones de dólares al año para el largo plazo. Parte del financiamiento será canalizado a través del recién lanzado Fondo Climático Verde. Los países en desarrollo aceptaron ampliar sus reportes con actualizaciones bianuales y revisar sus acciones de mitigación.
- Adoptar un mecanismo REDD+ para crear incentivos para reducir la deforestación y degradación de bosques a través de fases. Se definieron salvaguardas.

### **Acuerdos de Cancún**

REDD+ es un mecanismo voluntario para los países en vías de desarrollo que cuenten con macizos forestales, sin embargo la CMNUCC establece los requisitos que un país debe de realizar para ser parte del mismo, por lo anterior los acuerdos que se tomaron en la COP 16 fueron un importante avance al respecto, ya que establecieron criterios mínimos para seguir en el proceso de construcción de REDD+. Estos acuerdos definen que se deberá establecer a nivel nacional y de acuerdo a sus circunstancias y capacidades respectivas:

I. Un plan de acción o estrategia nacional. Se refiere a una estrategia que sirva de guía para la implementación de REDD+ a nivel nacional.

II. Niveles nacionales de referencia de emisiones forestales o niveles nacionales de referencia forestal. Se refiere al estatus actual del balance de emisiones.

III. Sistemas nacionales de monitoreo forestal (sistema MRV) robustos y transparentes para reportar emisiones y absorciones asociadas a los bosques. Se refiere a un sistema donde se lleve la contabilización de las emisiones y absorciones y que sirva para reportar a la CMNUCC.



IV. Un sistema para informar cómo se están cumpliendo las salvaguardas en el diseño de la estrategia nacional. Se refiere a la inclusión y respeto de las comunidades locales y los pueblos indígenas, así como la conservación de los ecosistemas, su biodiversidad y los servicios que proveen.

Reconociendo que la implementación subnacional (a nivel estatal, regional y local) puede ser un enfoque interino que resulte útil para diversos países; la decisión de Cancún abre la posibilidad para que un país pueda implementar acciones REDD+ de manera subnacional siempre y cuando garantice la consistencia con el marco nacional emergente. Esto implica que los países, deben visualizar el sistema nacional desde un inicio y ver la acción subnacional como parte de un sistema anidado.

### **El mecanismo de reducción de emisiones por deforestación y degradación (REDD+)**

Para alcanzar las metas de las reducciones de GEI definidas a nivel internacional por el IPCC, no basta con reducir las emisiones de sectores no forestales, hay que reducir los niveles de deforestación y degradación actuales.

REDD+ son las siglas para Reducción de Emisiones derivadas de la Deforestación y Degradación forestal, así como conservar, manejar sustentablemente e incrementar los almacenes de carbono en los bosques. Se refiere al mecanismo que integra actividades que reducen la deforestación y degradación de un área, región o país con un cálculo de las reducciones de emisiones de CO<sup>2</sup> a la atmósfera.

Un elemento subyacente de las negociaciones sobre REDD+ es que los esfuerzos de los países en vías de desarrollo por reducir sus emisiones y tasas de deforestación tengan el apoyo de los países desarrollados.

REDD+ abre una nueva ventana de oportunidades para la reducción de la deforestación y degradación, así como para conservar y aumentar los almacenes de carbono en los bosques.

Este mecanismo considera la importancia que tienen los bosques en la mitigación del cambio climático: así como su biodiversidad y, por ser sustento de vida de muchas comunidades y ejidos, entre otros. La mitigación del cambio climático es una preocupación de los pobladores de todo el mundo y no sólo de poblaciones locales.



Algo importante a considerar es que el mecanismo REDD+ deberá de integrarse y complementar procesos en marcha tendientes a reformar o fortalecer la gobernanza forestal, con el fin asegurar los derechos de las comunidades locales y los pueblos indígenas que dependen de los bosques, propiciar el acceso y la distribución equitativa de beneficios, promover el manejo sostenible de los bosques y la conservación de la biodiversidad.

Para conocer sobre los temas y conceptos básicos de REDD+ es necesario leer la guía básica en Bosques, cambio climático y REDD+ en México; fue elaborada por el Área de Mercados y Proyectos Forestales de Carbono adscrita a la Coordinación General de Producción y Productividad CONAFOR 2012<sup>10</sup>.

---

<sup>10</sup> Visitar la página [www.conafor.gob.mx](http://www.conafor.gob.mx)