



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN GEOGRAFÍA

INSTITUTO DE GEOGRAFÍA

EVALUACIÓN DE LOS RESERVORIOS DE CARBONO DEL SUELO EN
LA MICROCUENCA DEL RÍO LA PLANCHA, RESERVA DE LA BIOSFERA
MARIPOSA MONARCA

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRA EN GEOGRAFÍA

PRESENTA:

MAVIAEL SARAI VELÁZQUEZ QUINTANA

TUTOR

DR. JOSÉ LÓPEZ GARCÍA (Instituto de Geografía, UNAM)

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR

DRA. LILIA DE LOURDES MANZO DELGADO (Instituto de Geografía, UNAM)
DR. RODOLFO SERRATO CUEVAS (Facultad de Ciencias agrícolas, UAEM)
MTRO. JOSÉ MANUEL ESPINOZA RODRÍGUEZ (Facultad de Filosofía y Letras, UNAM)
MTRO. OSWALDO NÚÑEZ CASTILLO (Dirección de Desarrollo Técnico, DGIRA)

CIUDAD DE MÉXICO, MARZO 2016



Universidad Nacional
Autónoma de México



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 Institucionales

Al Programa de Posgrado en Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México, por haber contribuido en mi formación y así culminar un logro académico con la maestría.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por apoyarme con la beca durante mis estudios de maestría.

Al proyecto PAPIIT IN305707-3 "Evaluación del cambio de cobertura forestal bianual con fotografías aéreas digitales en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca"

Al proyecto PAPIIT IN205215 "Evaluación de los cambios de cobertura forestal en Áreas Naturales Protegidas"

Al Laboratorio de Edafología "Nicolás Aguilera" por permitirme realizar las pruebas de suelos requeridas.

A mi asesor de tesis el Dr. José López García por confiar en mí y en este trabajo, por apoyarme no sólo con su conocimiento sino por alentarme a superarme y a culminar esta tesis.

A los miembros del jurado Dra. Lilia de Lourdes Manzo, Dr. Rodolfo Serrato, Mtro. José Manuel Espinoza y el Mtro. Oswaldo Núñez, por sus certeros comentarios que complementaron y mejoraron este trabajo.

A Diego González y Fernando a sus familias por todo el apoyo en campo, por sus experiencias compartidas y su gentileza para llevar a cabo esta tesis.

Agradecimientos y dedicatorias personales

A las dos personas que más amo en todo el mundo mis queridos padres Marcos Velázquez Martínez y Margarita Quintana Durán en primer instancia por brindarme la oportunidad de venir a este mundo, por todo el apoyo que me han proporcionado sin condición alguna. A mis hermosos hermanos Yeri Magali y Marco Hugo por ser mis ejemplos a seguir, por amarme y protegerme, por apoyarnos siempre, por enseñarme a vivir a su manera y extra.

A la nueva integrante de nuestra familia Lucianita la cual trajo mucha luz y alegría a todos nosotros, permitiéndonos experimentar un amor tan maravilloso. Espero jamás defraudarte, estaré contigo por siempre.

A toda mi familia empezando por mis abuelitos, tíos, tías, primos y primas que me han compartido no sólo su vida sino muchas enseñanzas y cariño.

A mis amigos de la maestría Luis Fernando, Yilotl Cázares, Arturo Ramos y Melina Maravilla, por todo su apoyo incondicional, por las alegrías, las tristezas y el tiempo que me brindaron para compartir esta etapa de su vida y espero de todo corazón seguir con nuestra amistad.

A mis amigos de la Facultad de Ciencias Alma Flores, Mauricio Vargas e Ivan Flores, sin ustedes la instancia en la Facultad no hubiera sido la misma y a pesar de la distancia y los tiempos, siguen apoyándome y siendo únicos.

Agradezco a mis amigos Biólogos y Geógrafos de la sala de cómputo del Instituto de Geografía: Alfonso Carbajal, Guadalupe Hernández, Pablo Leautaud y Jesús Domínguez por su apoyo en la elaboración de la tesis, por compartir su experiencia y conocimiento.

A Jesús Sánchez por su apoyo incondicional y ayudarme a realizar los muestreos en campo para concluir esta tesis, realmente su gentileza y amistad son invaluableles.

A mis mejores amigos de siempre, de la vida: Ana Karen Camacho, Roberto Abraham Trejo y Rodrigo Tecaxco con los que he pasado un largo camino, instantes felices y difíciles son los mejores amigos que la vida pudo poner en mí camino, gracias por estar conmigo por compartirme sus vivencias y espero nunca defraudarlos, confió en que seguiremos estando juntos.

A Marc por enseñarme a ser valiente y esforzarme por lo que realmente quiero, motivarme a realizar muchas, muchas cosas y que nada es imposible, por brindarme su amistad y hacerme creer que aún existen personas buenas.

A Luis E. por mostrarme lo maravillosa que es la vida, lo que realmente tiene valor en ella, por su intensidad por vivirla, por detener el tiempo, por hacerme ver mi mundo más grande y brillante, y por los lindos momentos.

Contenido	
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVO GENERAL	5
OBJETIVOS PARTICULARES	5
HIPÓTESIS	5
Capítulo I MARCO CONCEPTUAL	6
1.1 El cambio climático y almacenes de carbono	7
1.1.1 El cambio climático	7
1.1.2 Efecto invernadero	11
1.1.3 Ciclo y almacenes de carbono.....	14
1.1.4 Carbono orgánico en el suelo.....	20
1.1.5 Suelos volcánicos	24
1.1.6 Deforestación y degradación forestal.....	28
1.2 Servicios ecosistémicos	36
1.2.1 Mecanismos de pago por captura de carbono	40
Capítulo II RESERVA DE LA BIOSFERA MARIPOSA MONARCA MICROCUENCA	
RÍO LA PLANCHA	46
2.1 Localización microcuenca del río La Plancha	47
2.2 Geología	48
2.3 Clima	51
2.3.1 Temperatura media	52
2.3.2 Precipitación	55
2.4 Edafología	57
2.5 Vegetación	57
2.6 Aspectos socioeconómicos	60
2.6.1 Actividades económicas	60
Capítulo III METODOLOGÍA GENERAL	64
3.1 Método y materiales	65
3.2 Fotointerpretación	67
3.4 Muestreo para la estimación de carbono orgánico del suelo	72
3.5 Análisis de laboratorio	73
3.5.1 Carbono orgánico del suelo	73

3.5.2 Valoración del pH.....	74
3.5.3 Aluminio extractable con pirofosfato	74
3.5.4 Color del suelo.....	74
3.5.5 Textura	74
3.6 Elaboración de la cartografía para la distribución espacial de los principales almacenes de carbono.....	75
Capítulo IV EVALUACIÓN DE LA COBERTURA FORESTAL MICROCUENCA DEL RÍO LA PLANCHA.....	76
4.1 Evaluación de la cobertura forestal	77
4.1.1 Dinámica del cambio de densidad de la cobertura forestal y uso de suelo (1971-2015)	79
4.1.2 Distribución espacial de la densidad de cobertura forestal y cambio uso de suelo microcuenca río La Plancha	87
4.1.3 Relación entre densidad de cobertura forestal y localización de colonias de mariposa monarca, microcuenca río La Plancha.....	93
4.2 Densidad de cobertura forestal, índices de vegetación y la estructura horizontal, microcuenca río La Plancha	98
4.2.1 Comparación de los índices de vegetación y la densidad de cobertura forestal	105
4.2.2 Estructura horizontal y vertical del bosque y su relación con los índices de vegetación.....	113
Capítulo V CARBONO ORGÁNICO EN SUELOS VOLCÁNICOS	122
5.1 Los suelos como sumidero de carbono	123
5.1.1 Unidades morfoedológicas	124
5.1.2 Distribución vertical del carbono orgánico del suelo	131
5.1.3 Distribución espacial de los reservorios de carbono orgánico del suelo	144
5.2 Kriging ordinario para la estimación de reservorios de carbono.....	154
5.2.1 Análisis exploratorio de datos para carbono orgánico en el suelo	156
5.2.2 Análisis variográfico	160
5.2.3 Estimación espacial y mapeo del modelo	166
Capítulo VI DISCUSIÓN.....	170
CONCLUSIONES.....	176
REFERENCIAS.....	178

INTRODUCCIÓN

El suelo es la mayor reserva de carbono orgánico en los ecosistemas terrestres, almacena un total de 2, 344 GT de carbono orgánico (Jobbágy & Jackson 2000), por lo que recientemente su estudio ha generado un gran interés al desempeñar un papel crucial al reducir o desacelerar el contenido de dióxido de carbono en la atmósfera (Lal, 2004). Sin embargo, el carbono orgánico del suelo representa otros beneficios como la fertilidad del suelo, crecimiento de las plantas y producción de biomasa orgánica (Janzen, 2006), estabilidad de agregados, que a su vez, determinan su erosionabilidad. Además, el aumento de carbono se ha ligado con un incremento en la capacidad de retención de agua que puede proporcionar mayor capacidad de resistencia y resiliencia en el paisaje bajo cambio climático (Andrews *et al.*, 2004).

El carbono orgánico llega al suelo principalmente a través de la absorción del gas carbónico en la atmósfera (CO₂), presente en una concentración de 0.03 % (300 mmol por mol de aire), que a través de las plantas es absorbido por difusión desde el medio en el que está más concentrado (el aire), hacia el menos concentrado (el líquido intracelular en las plantas) a través de los estomas. La materia seca vegetal tiene un contenido bastante estable de cadenas de carbono, que constituye el esqueleto de todas las sustancias orgánicas de las células (proteínas lípidos y carbohidratos) (Goudriaan, 1992). Según Hoen & Solberg (1994) las plantas transfieren

carbono hacia el suelo por diferentes vías; las más importantes son la hojarasca (desprendimiento de hojas y partes muertas de las plantas), los exudados (secreciones de compuestos orgánicos solubles de las raíces al suelo) y la transferencia de carbono a los organismos que están asociados simbióticamente con las raíces (micorrizas y bacterias fijadoras de nitrógeno).

El carbono orgánico del suelo (COS) se define como un continuo de materiales orgánicos, en diferentes estados en descomposición, con distintos tiempos de permanencia (Jastrow & Miller, 1998).

Los factores que intervienen en la acumulación de este carbono son diferentes en espacio y tiempo, entre estos se considera a la interacción de procesos geomórficos y bióticos (Ellerter *et al.*, 2001), tipo de vegetación, clima (Guo & Gifford 2002), la distribución de raíces, el contenido de arcillas (Arrouays & Pelissier, 1994) y la historia de manejo de suelo (Smith, 2003). Destacando así el cambio de uso/cobertura del suelo (LUCC Land use and cover change) como una de las fuentes de cambio de carbono a nivel global, ya que afecta el balance de carbono debido a que modifica los flujos y almacenes de este elemento (Lal, 2004). Mundialmente, las emisiones de CO₂ por efecto del LUCC son la segunda mayor fuente antropógena estimada en 1.5-0.7 PgC anuales (Le Querre *et al.*, 2009).

En México debido a la disminución de la superficie boscosa durante el período 2000-2010 se ubica entre los primeros diez países con mayor pérdida de bosques con 311,000 ha/año (FAO, 2010). En donde la situación de los bosques de México y la realidad social han marcado esta tendencia al cambio de usos de suelo y degradación forestal (CONAFOR, 2008).

Así, el reto más atrevido lo constituye la conservación de los ecosistemas templados; ya que en sus diferentes ecorregiones, se encuentra la más alta concentración y densidad de población del país. Su importancia se puede evidenciar por el hecho de que México se considera como el centro más importante de diversidad y evolución de los pinos y encinos (De la Maza, 2007). Los bosques templados que se presentan en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca (RBMM) también han presentado escenarios de deforestación y degradación forestal, una de las principales causas son; la explotación clandestina, o tala ilegal, motivada principalmente por la presión que ejercen varias industrias sobre los recursos forestales, los escasos estímulos para hacer un buen manejo de los bosques, las malas prácticas de algunos técnicos forestales y la capacidad de la institución correspondiente para combatirlos (Merino & Hernández, 2004).

La pérdida y degradación de la cobertura boscosa afecta directamente la adición de materiales orgánicos al suelo, al disminuir los sistemas forestales las reservas de carbono también, por lo que su monitoreo y

regulación se ven implicadas para comprender el contenido de carbono orgánico en los suelos.

De esta manera, el objetivo de este trabajo fue llevar a cabo la evaluación del potencial de almacenaje de carbono en la Microcuenca del río La Plancha localizada dentro la Biosfera Mariposa Monarca en el estado de Michoacán y analizar su relación con las superficies deforestadas y degradadas en los bosques templados y su distribución espacial. Así mismo, reconocer cuáles son las prácticas de conservación y valoración de los servicios ambientales que existen en el área y que pueden estar influyendo en el almacenaje de este elemento y, de esta forma, mitigar el aumento de los gases de efecto invernadero relacionado directamente con el calentamiento global y el cambio climático, una problemática ambiental que compete a las sociedades actuales.

OBJETIVO GENERAL

- Evaluar el potencial de almacén de carbono en el suelo de la microcuenca del río La Plancha, RBMM.

OBJETIVOS PARTICULARES

- Evaluar el potencial de captura de carbono en los suelos en bosques templados.
- Caracterizar los cambios multitemporales de la cobertura forestal en el período de 1971, 1984, 1994, 2004, y 2015.
- Relacionar la captura de carbono con la dinámica de cambio de la cobertura forestal por unidad geomorfológica.
- Reconocer las prácticas de conservación con la captura de carbono.

HIPÓTESIS

En los paisajes volcánicos se pueden identificar diferentes tipos de suelo y vegetación dependiendo directamente de su posición en el relieve y material parental; por tanto, los reservorios de carbono presentarán patrones espaciales.

Capítulo I

MARCO CONCEPTUAL



1.1 El cambio climático y almacenes de carbono

1.1.1 El cambio climático

A lo largo de más de cuatro mil millones de años, la Tierra ha tenido una gran variedad de alteraciones climáticas. Con lo que respecta a los dos últimos millones de años se han alternado glaciaciones y épocas de clima cálido que han afectado de forma determinante a todas las formas de vida del planeta, suponiendo grandes cambios e incluso, la desaparición de ecosistemas enteros, a pesar de que la temperatura media de la Tierra sólo ha variado unos cinco o seis grados entre una época climática y otra (Watkins *et al.*, 2007).

Así, hace 13 500 años se produjo un cambio climático importante cuando la Tierra se calentó y el nivel del mar subió, provocando inundaciones que crearon el mar Báltico, mar Negro y eliminaron a todos los animales mayores que el coyote de norte de América. Estos sucesos no ocurrieron de golpe, pero sí en pocos cientos de años. Desde hace unos 10 mil años, el clima ha aumentado su temperatura de manera paulatina, aunque no constante. A partir del año 1200 de nuestra era, el clima comenzó a enfriarse poco a poco y hacia el año 1650, se dio la época más fría, conocida como la pequeña edad del hielo. Desde ese momento, el clima volvió a incrementar su temperatura y, a partir de la década de 1980, ese calentamiento se ha disparado. A pesar de estas variaciones, la tendencia del clima es al calentamiento. Los casquetes polares están sujetos a

procesos de deshielo desde la época romana, lo que ha propiciado el ascenso paulatino del nivel del mar (Pastrana, 2008).

La existencia del hombre sobre el planeta ha implicado desde sus orígenes una alteración sobre su medio natural, se tiene evidencia que los primeros en reconocer el cambio climático fueron pensadores de la antigüedad, destacando a Teofrasto, discípulo de Aristóteles quien identificó que los efectos del desagüe de los pantanos propiciaba que una localidad fuera más susceptible a la congelación y que los suelos se hacían más calientes cuando se deforestaban (Neumann, 1985); sin embargo, estas variaciones eran concebidas a un nivel regional y no se contemplaba la posibilidad de una afectación a escala global.

Antes del siglo XVII los científicos no sospechaban que el clima prehistórico fuera diferente a los períodos actuales, fue a partir de entonces cuando geólogos inician la búsqueda de evidencias sobre los paleoclimas destacando a James Hutton, con sus postulados uniformistas explicando que acontecimientos del pasado son los mismos que actúan en el presente (Simmon, 2005). Desde entonces se han realizado estudios sobre los efectos de las actividades humanas en la estabilidad atmosférica del planeta pero es hasta los años ochenta cuando se empieza hablar de un consenso científico que avala el cambio climático global, para 1988 se crea El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de

las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), desde entonces el IPCC genera informes que contienen la evaluación científica, técnica y metodológica de base, un resumen para responsables de llevar a cabo las políticas propuestas en las administraciones (Resúmenes para Responsables de Políticas, RRP) y un capítulo con consideraciones generales (IPCC, 2001).

De esta manera, se define al cambio climático como “una importante variación estadística en el estado medio del clima o en su variabilidad, que persiste durante un período prolongado (normalmente decenios o incluso más). El cambio climático se puede deber a procesos naturales internos o a cambios del forzamiento externo, o bien a cambios persistentes antropogénicos en la composición de la atmósfera o en el uso de las tierras” (IPCC, 2001).

De esta manera la temperatura global de la superficie terrestre ha incrementado desde finales del siglo XIX implicando que las temperaturas de las última tres décadas sean las más altas registradas instrumentalmente. La temperatura global de la tierra y del océano combinadas muestran un aumento de aproximadamente 0,89 ° C [0,69-1,08] durante el período de 1901 a 2012 y alrededor de 0,72 ° C [0,49-0,89] durante el período de 1951 a 2012 (IPCC, 2013).

Estas variaciones en la temperatura del planeta producirán algunos impactos globales. Con un *grado de confianza medio*, entre el 20 y el 30% aproximadamente de las especies consideradas hasta la fecha se verán amenazadas a la extinción provocada por el calentamiento mundial que aumente en más de 1.5-2.5°C (respecto del período 1980-1999). Si el promedio de la temperatura mundial aumentara en más de 3.5°C, las proyecciones de los modelos indican que podrían sobrevenir extinciones masivas (entre el 40% y el 70% de las especies estudiadas) en todo el mundo (IPCC, 2007), además de sus implicaciones en los diversos ecosistemas terrestres y marinos el cambio climático pone en riesgo el desarrollo humano y el principio básico del mismo garantizaba un futuro mejor.

Es una crisis ambiental que está determinando el desarrollo de la sociedad actual, así como el equilibrio en los ecosistemas y aunque los impactos del cambio climático ocurren como sucesos cotidianos, en donde la mayoría pasan inadvertidos en el mercado financiero y no están directamente registrados en el Producto Interno Bruto Mundial, estos fenómenos han adquirido un creciente interés en los últimos años, lo que se vería reflejado para el 2015 en tener que invertir por lo menos US\$ 44,000 millones cada año para el desarrollo “a prueba del clima” (Watkins , 2007).

1.1.2 Efecto invernadero

Cualquier cambio en el sistema climático originará un cambio en el clima; estos cambios pueden ser producidos por dos factores que pueden ser externos o internos. Los factores externos son aquellos que actúan fuera del sistema climático, por otro lado los factores internos involucran al clima en sí mismo (Buchdahl, 1999). Entre los factores externos causantes del cambio climático se considera a las variaciones galácticas y orbitales, la oblicuidad, excentricidad y precesión de la Tierra, los Ciclos de Milankovitch y la variación solar. Dentro de los factores internos se considera a la orogenia, la epirogenia, la actividad volcánica, la circulación oceánica y los cambios en la composición atmosférica (Ruddiman & Kutzbach, 1991). Entonces existen diversos factores que alteran el clima del planeta; sin embargo, a la fecha existe un consenso por parte de la sociedad científica quienes señalan que el 95% del aumento general de la temperatura es superior al que se produciría por las variaciones naturales del clima planetario, es decir este alto porcentaje está siendo generado por la acción humana (IPCC, 2013).

Desde el comienzo de la industrialización, las actividades humanas para la producción de energía por la quema de combustibles fósiles han acelerado los procesos de liberación de grandes cantidades de dióxido de carbono (CO₂) a la atmósfera. El CO₂ atmosférico ha aumentado en un 40% de 278 ppm en 1750 a 390.5 ppm en el 2011. Es inequívoco que las concentraciones actuales en la atmósfera exceden niveles medidos en al

menos los últimos 800, 000 años. Por otro lado, la tasa media del aumento de este gas observada en el siglo pasado supera cualquier caso observado de cambio a lo largo de los 20, 000 años anteriores (IPCC, 2013).

Las emisiones de CO₂ antropogénico a la atmósfera fueron de 545 ± 85 PgC (1 PgC= 10^{-15}) entre 1750 y 2011. De esta cantidad, la combustión de combustibles fósiles y producción de cemento aportó 365 ± 30 PgC y con lo que respecta el cambio de uso de tierra es la segunda fuente de emisiones más importante aportando 180 ± 80 PgC (IPCC, 2013).

La afectación del aumento en la concentración de estos gases de efecto invernadero (CO₂, CH₄, NO_x, CFCS, etc.) radica en que retienen el calor en el sistema superficie *tropósfera*. Este fenómeno se denomina *efecto invernadero*. En donde la radiación infrarroja térmica de la tropósfera está fuertemente acoplada a la temperatura de la atmósfera a la altitud en que se emite. Un aumento de la concentración de gases de efecto invernadero da lugar a una mayor opacidad infrarroja de la atmósfera quedando el calor atrapado y produciendo un aumento en la temperatura de la superficie del planeta (IPCC, 2007).

Como se puede observar en la (Figura 1), el incremento en los gases de efecto invernadero principalmente el CO₂ se da de forma desigual alrededor del mundo en donde las fronteras políticas y los sistemas de producción tienen una enorme influencia con la cantidad de gas liberado a

la atmósfera; los países desarrollados representan en su conjunto aproximadamente 7 de cada 10 toneladas emitidas (Watkins *et al.*, 2007).

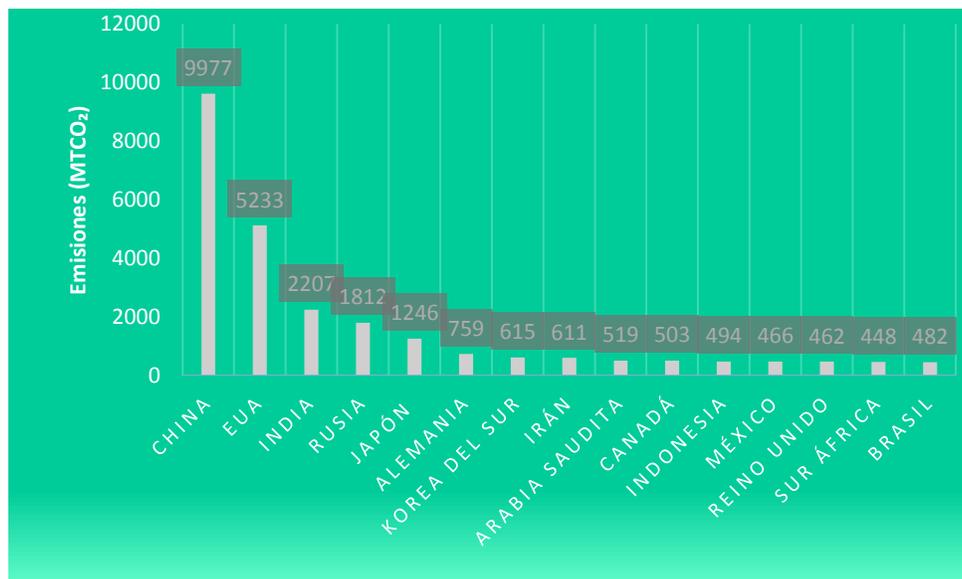


Figura 1 .Principales países emisores de CO₂ durante el 2013 (Global Carbono Atlas, 2013)

Así, los países desarrollados son quienes deben asumir el liderazgo en temas de mitigación del cambio climático, generando cambios en el esquema de generación de energías alternas y regulación de sus políticas ambientales, ya que son quienes tienen la carga de la responsabilidad histórica en la producción de una gran cantidad de emisiones.

1.1.3 Ciclo y almacenes de carbono

Las emisiones de CO₂ a la atmósfera naturalmente se encuentran reguladas en el ciclo del carbono en donde se generan un conjunto de flujos y depósitos interconectados (Figura 2). El carbono en la Tierra se distribuye en cuatro grandes reservorios: Atmósfera, Hidrósfera, Litosfera y Biosfera terrestre (Holmén, 2000). En la atmósfera principalmente se encuentra al carbono como CO₂ y es aquí donde se encuentra el más pequeño y dinámico de esos reservorios (700-760 Gt C), que interactúa con los océanos y los ecosistemas terrestres, circulando constantemente debido a los procesos de fotosíntesis y respiración (Chapin *et al.*, 2002). En los océanos el carbono se encuentra 50 veces más que en la atmósfera principalmente disuelto como carbono inorgánico. Por otro lado, es la litósfera en donde se encuentra en mayor cantidad representando un 99% del total (Schlesinger, 1985) el carbono en este almacén circula de manera muy lenta, en escala de tiempo de millones de años a través de procesos geológicos como la deriva continental, vulcanismo, metamorfismo e intemperismo. A su vez la vegetación es capaz de almacenar 610 Gt.

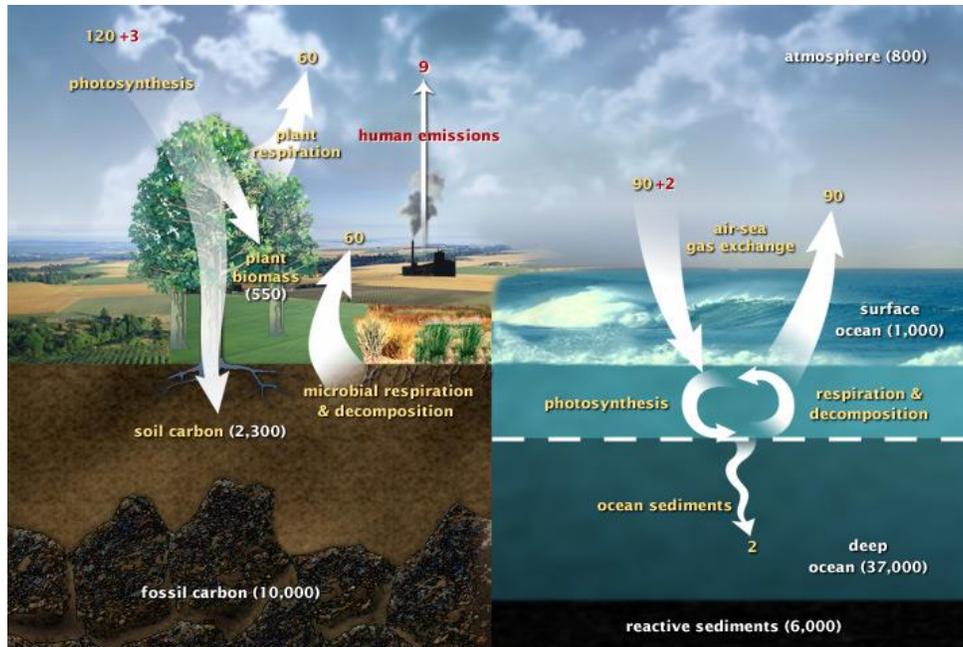


Figura 2 .Ciclo del carbono (NASA, 2010)

Se considera como un sumidero de gases de efecto invernadero, según la Convención (1992), “cualquier proceso, actividad o mecanismo que absorbe o elimina de la atmósfera uno de estos gases efecto invernadero o uno de sus precursores, o bien un aerosol y que lo almacena. Si la cantidad de CO₂ absorbida es mayor que la cantidad de CO₂ emitida será un sumidero de carbono”.

En los sistemas forestales el ciclo del carbono se lleva a cabo a través del bióxido de carbono (CO₂), presente a una concentración de 0.03 % (300 mmol por mol de aire), la única fuente de carbono para las plantas, en donde a partir de la energía lumínica, los fotosistemas PSI y PSII, el agua es usada como maquinaria fotoeléctrica para la reducción de NADP⁺ que se usan posteriormente para la transformación de CO₂ en carbohidratos

(Ben-She & Nelson 2004). El paso de este gas a las plantas tiene lugar por difusión desde el medio en el que está más concentrado (el aire), hacia el menos concentrado (el líquido intracelular) a través de los estomas.

Una vez que se produce la glucosa esta sufre procesos de polimerización por complejos enzimáticos ubicados en la membrana plasmática (Handford, 2006). Involucrando a los genes que codifican para la celulosa sintetasa (CesA), así la celulosa se sintetiza a partir de multi-complejos enzimáticos ubicados en la membrana plasmática al final de la microfibrilla de celulosa en crecimiento. El complejo usa UDP-glucosa como sustrato y requiere de un constante suministro de sacarosa sintetizada, enzima que entrega UDP-glucosa a partir de sacarosa (Cardemil *et al.*, 2007).

La pared celular de las plantas está constituida principalmente por celulosa y una variedad de polisacáridos (hemilcelulosa y pectinas), proteínas y compuestos fenólicos. Las paredes celulares de las plantas ricas en polisacáridos son biomateriales importantes que sustentan el crecimiento y estructura de plantas, son los principales depósitos del carbono proveniente de fotosíntesis (Somerville *et al.*, 2004; Leroux *et al.*, 2006; Lee *et al.*, 2011).

A nivel de ecosistema estos procesos se traducen en la Producción Primaria (PP) es decir la tasa de energía secuestrada en forma de tejido por unidad de área, mediante la fotosíntesis donde se forma Productividad

Primaria Bruta (PPB); sin embargo, la planta requiere de cierta cantidad de energía para su propio metabolismo, crecimiento, mantenimiento y adquisición de nutrientes conocida como respiración autótrofa, entonces la diferencia entre la asimilación del follaje y la respiración nocturna se conoce como Producción Primaria Neta PPN (Roy & Saugier, 2001).

Así existe una relación entre la productividad y la biomasa, ya que la biomasa se explica a través una función acumulativa de carbono al follaje, raíces finas y materiales leñosos a pesar de estar relacionadas debe hacerse hincapié en que la biomasa se usa muchas veces para estimar la productividad (Whitmore, 1975). Sin embargo, la biomasa resulta algo más complejo que estudiar y medir siendo una propiedad que está limitada por la altura de los árboles integrando diversos procesos funcionales y atributos estructurales, en donde se relacionan la productividad, área basal, altura y la densidad de la madera. La biomasa está regida por el equilibrio, entre la velocidad de producción de madera (crecimiento) y la velocidad con la que se pierde (mortalidad) en un ecosistema. De esta manera la biomasa en los diferentes ecosistemas presentan variaciones, a nivel mundial, el patrón latitudinal de fijación de carbono más rápido. A nivel del paisaje, los atributos forestales están fuertemente influidos por perturbaciones, condiciones edáficas, la topografía y las secuencias sucesionales (Franklin *et al.* 2002, Quesada *et al.* 2012).

En los bosques sucesionales jóvenes se presentan una mayor proporción de especies de crecimiento rápido y una mayor tasa de mortalidad debido a la competencia por la luz y el espacio cada vez mayor entre árboles y la menor asignación bajo el suelo (Enquist & Noklas, 2002) resultando en una baja densidad arbórea y biomasa. Por lo contrario, en bosques sucesionales maduros se caracterizan por especies más tolerantes a la sombra. Estas especies pueden presentar tasas rápida de crecimiento de biomasa después del cierre del dosel (Ryan *et al.*, 2004). De esta manera la biomasa estará influenciada por una serie de variables; por una parte la tasa de mortalidad en toda la comunidad, las condiciones edáficas, climáticas y las características de las especies dominantes de árboles (Strigul *et al.*, 2008).

A nivel global los bosques son capaces de almacenar 772 Pg C año⁻¹ en su biomasa aérea de los cuales los bosques tropicales son los principales sumideros con un total de 352 Pg C, mientras que los bosques templados son capaces de almacenar en la biomasa aérea un total de 161 Pg C, los bosques boreales almacenan 180 Pg C y otros tipos de usos sin incluir a la agricultura representan un reservorio de 79 Pg C (Prentice *et al.*, 2011).

De esta manera, los almacenes de carbono se presentan en diferentes condiciones no sólo por el tipo de bosque, sino también por los suelos que en los que se desarrollan además de otros factores como la temperatura y disponibilidad de agua para la producción y descomposición de la materia orgánica; en donde las temperaturas más cálidas y húmedas provocan la

rápida mineralización de la materia orgánica del suelo además de los impactos de las sociedades humanas en su ambiente.

Por ello resulta imprescindible conocer cuáles son las características de los diferentes bosques y los suelos relacionados a estos para lograr comprender la dinámica de almacenaje del carbono.

En los ecosistemas terrestres no sólo se almacena carbono en la biomasa de vegetal, también el suelo es considerado como el mayor sumidero de carbono terrestre almacenando 2344 Gt presentando una alta variabilidad horizontal y verticalmente, por lo que en la actualidad esta propiedad de almacenar se ha considera como una medida de mitigación de los gases de efecto invernadero (Jobbágy & Jackson, 2000); sin embargo, la materia orgánica y el carbono orgánico del suelo (COS) no sólo intervienen en la regulación de la calidad del aire sino que están relacionados directamente con la fertilidad, crecimiento de las plantas y productividad (Janzen, 2006), participan en la conservación del agua. El COS está asociado con la estabilidad de agregados que a su vez determina erosionabilidad. El aumento de COS también se ha vinculado a una mayor disponibilidad y capacidad de retención de agua que pueden proporcionar una mayor capacidad de resiliencia del paisaje bajo condiciones de cambio climático (Andrews *et al.*, 2004). Con base en esto, el carbono del suelo es considerado como uno de los indicadores clave en la conservación de suelos.

1.1.4 Carbono orgánico en el suelo

El carbono orgánico del suelo (COS) ha sido descrito como un continuo de materiales orgánicos, en diferentes estados en descomposición con distintos tiempos de permanencia (Jastrow & Miller, 1998). Este COS forma una parte importante de la materia orgánica del suelo (MOS), conceptualmente el componente orgánico puede definirse como una combinación entre parte viva y la materia orgánica muerta. La materia orgánica viva es representada por las raíces de las plantas, los animales del suelo y la biomasa microbiana (Nieder & Bendi, 2008). La materia orgánica muerta puede ser diferenciada tomando en cuenta la cinética de su descomposición en pasivo, lento y activo (Tabla 1), se caracterizan por su composición y las tasas de descomposición, en donde se mide en años, meses, semanas o días la descomposición de los depósitos activos, en décadas los depósitos lentos y en siglos o milenios los pasivos (Elliott *et al.*, 1996; Feng & Li, 2001).

Tabla 1. Diferenciación de depósitos de materia orgánica MOS (Baldock 2007)

Fuente	Composición	Depósito
<i>Residuo de plantas en superficie</i>	El material vegetal que reside en la superficie del suelo, incluyendo la hojarasca y cultivo / material de pastos	Depósito activo (lábil) La descomposición se produce a una escala de tiempo de días a años
<i>Residuo de plantas enterradas</i>	El material vegetal mayor que 2 mm en tamaño que reside dentro del suelo	Depósito activo (lábil) La descomposición se produce a una escala de tiempo de días a años
<i>Partículas de materia orgánica</i>	Material orgánico semi-descompuesto menor que 2 mm y mayores de 50 micras de tamaño	Depósito activo (lábil) La descomposición se produce a una escala de tiempo de días a años
<i>Asociación mineral (humus)</i>	Materia orgánica bien descompuesta más pequeña que 50 micras de tamaño, asociada con las partículas del suelo	Depósito lento (estable) La descomposición se produce a una escala de tiempo de días a años
<i>Materia orgánica resistente</i>	Materiales de carbón o carbonizados que resultados de la quema de orgánica materia (resistente a descomposición biológica)	Depósito pasivo (recalcitrante) La descomposición se produce a una escala de tiempo de décadas a miles de años

Así, los diferentes depósitos tienen características particulares encontrándose a los depósitos con tasa de descomposición activa se equiparan con material reciente de MOS, con alto valor nutricional o valor energético, macroagregación en superficie pero transitoria. Mientras que los depósitos de lenta descomposición presentan protección física, a

diferencia de los depósitos con descomposición pasiva que son recalcitrantes debido a las características bioquímicas y/o asociación mineral (Wander, 2004). De esta manera también se puede separar a los componentes de la MO en tres categorías según su nivel de descomposición según Lickacz & Penny (2001); materia orgánica no descompuesta, materia orgánica parcialmente descompuesta y materia orgánica completamente descompuesta las cuales se describen a continuación.

Fresca o materia orgánica no descompuesta, incluye hojas recién caídas, ramas, flores, frutas, tejidos animales muertos, hongos etc., que se han incorporado en el suelo. Estos materiales comienzan a descomponerse inmediatamente después de su incorporación. A menudo se vuelve muy difícil separar la materia orgánica en descompuesta y no descompuesta por lo que se entiende como la materia orgánica fresca aquellos materiales donde el origen y la estructura pueden ser identificados. Se comprende alrededor 10.1% del total de MOS.

Materia orgánica parcialmente descompuesta, se compone de residuos en el suelo que han sido sometidos a un proceso de descomposición considerable. Donde la estructura y el origen de los materiales pueden ser identificados parcialmente. Consiste en la descomposición gradual detritus y parcialmente descompuestos de plantas y animales tejidos. Compone aproximadamente 10-40% del total de MOS. La MOS fresca; sin

descomponer, y parcialmente descompuesta en su conjunto constituyen la materia orgánica activa proporcionando el sostén para los organismos heterótrofos.

Materia orgánica completamente descompuesta, en realidad no está "completamente" descompuesta, ya que todavía se presenta descomposición que produce CO₂ y el agua con algunas bases. Está "plenamente" descompuesta en el sentido de que ha sido objeto de fragmentación y descomposición por un tiempo considerable, de algunos cientos o miles de años. El humus se compone de complejos orgánicos naturales estables formado por los productos de descomposición biológica y síntesis. El humus es bastante resistente a la descomposición debido a su naturaleza física y química del estado, está presente como recubrimiento de las partículas del suelo, como la goma dentro de los agregados, y como complejos órgano-minerales, que los hacen inaccesibles para los organismos de descomposición.

El humus contiene sustancias como lignina y polifenoles. Debido a estas sustancias, se considera materia orgánica pasiva. Compone de alrededor de 40-60% del total de MOS. De esta manera para la conservación de ecosistemas se debe tomar en cuenta que sólo el 40% de la MOS en un ecosistema es accesible para los organismos heterótrofos, que contribuyen a la productividad en los ecosistemas, por lo que la pérdida de esta capa de suelo resultaría en un desequilibrio ambiental.

1.1.5 Suelos volcánicos

El proceso de formación de ceniza volcánica inicia con la generación de una nube de piróclastos durante la erupción volcánica, conformada por partículas de diámetro inferior a 2 mm, conocidas como ceniza volcánica.

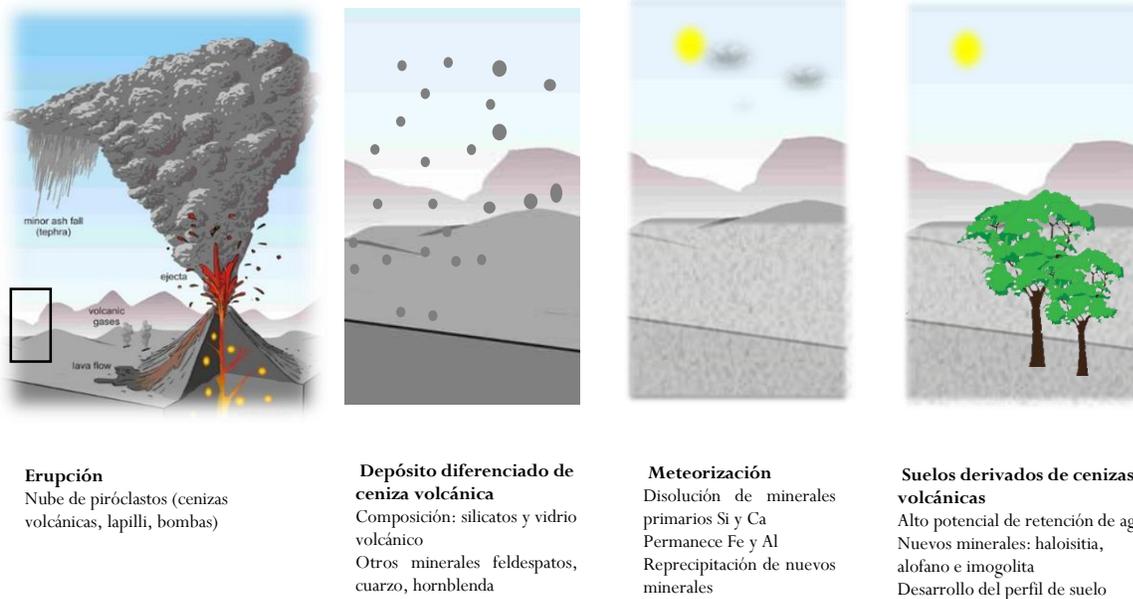


Figura 3 .Formación de los suelos derivados de cenizas volcánicas

Las cenizas volcánicas son generadas por la fragmentación del magma y de materiales en el cono volcánico provenientes de erupciones anteriores (Büttner *et al.*, 1999).

La ceniza está compuesta predominantemente por minerales primarios livianos y en menor proporción por minerales pesados (Shoji *et al.*, 1993).

La mineralogía de los suelos que se forman a partir de cenizas volcánicas presenta en la fracción arcilla (alofano, imogolita y haoloisita) derivados del avance del intemperismo de las cenizas volcánicas en particular del vidrio volcánico.

El alofano es un aluminosilicato hidratado en etapas tempranas del intemperismo del vidrio volcánico a partir de soluciones de sílice y aluminio y en condiciones de $\text{pH} > 4.7$ (Wada, 1987). La composición del alofano varía de acuerdo con el predominio de Al o Si. El alofano se ha considerado como un mineral amorfo; sin embargo, si presenta una estructura que consiste de esferas huecas con diámetros externos variando entre 3.5 y 5 nm y espesor entre 0.7 y 1 nm (Shoji *et al.*, 1993; Wada, 1987) Figura 4. Estas esferas se agrupan en agregados, los cuales se desarrollan entre partículas individuales debido a los enlaces cementantes, enlaces de hidrógeno, atracción eléctrica y fuerzas de Van der Waals (Rao, 1995).

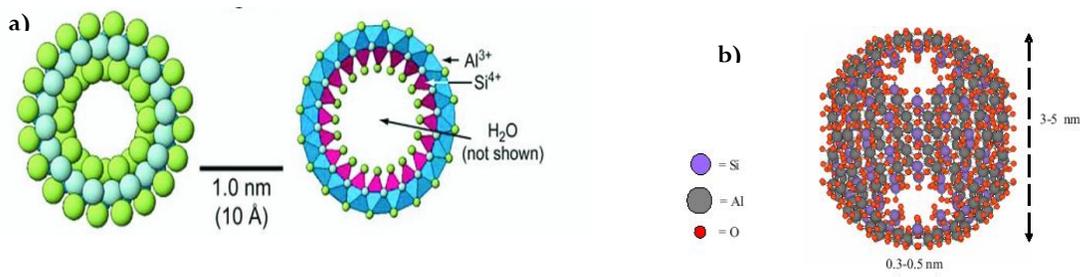


Figura 4 a) Estructura de aluminosilicatos imogolita y alofano b) Nanoesfera de alofano (Schulze, 2002)

Entre estos suelos formados a partir de cenizas volcánicas destacan los Andisoles o Andosoles los que presentan propiedades únicas debido a la abundancia de materiales no cristalinos como el alófana, imogolita y complejos AL/Fe-humus. Los suelos Andosoles tienen propiedades físicas y químicas que los diferencian de otros tipos de suelo entre estas destacan su composición en rica en aluminio, gran cantidad de acumulación de humus en los horizontes A, alta capacidad de retención de fosfatos, alta afinidad por cationes multivalentes, pH que va de lo ácido a ligeramente ácido. En cuanto a sus propiedades físicas relevantes están una alta porosidad, consistencia friable, estructura formada a partir de agregados de materiales no cristalinos, densidad aparente menos a 0.9 (Shoji *et al* 1993).

Los suelos derivados de cenizas volcánicas presentan propiedades químicas y mineralógicas únicas, regidas por su composición elemental rica en aluminio que se obtiene después de la lixiviación de Si, Na, Ca y así sucesivamente durante el avance de la pedogénesis. Esta característica permite que los suelos Andosoles presenten una acumulación alta de materia orgánica y por tanto de carbono orgánico, ya que se estabiliza en complejos con el Al, esta estabilización de complejos humus-Al sugiere fuertemente una relación lineal entre el Al extractable con pirofosfato y el contenido de carbono orgánico (Yoneyama *et al.*, 2001).

En los suelos con propiedades ándicas el carbono orgánico se acumula de forma más estable. Dentro de estos suelos, los Andosoles organominerales (no alofánicos) tienen tendencia a acumular más carbono orgánico que los alofánicos y con un mayor predominio de formas estables adsorbidas, frente a las formas más fácilmente oxidables, que son más abundantes en los andosoles alofánicos (Rodríguez *et al.*, 2004).

Los complejos Al y Fe –humus se forman principalmente en ambientes que son ricos en carbono orgánico y pH bajo, restringido a pH 5. (Pizarro *et al.*, 2003). De esta manera las propiedades mineralógicas de Andosoles alofánicos, presentan una superficie reactiva alta y son considerados como el principal agente de C-estabilización (Parfitt, 2009) facilitando la absorción de las moléculas orgánicas.

Sin embargo, el carbono almacenado en los suelos puede verse afectado por diversos factores entre ellos el cambio de uso de suelo en donde la conversión de los bosques en regiones agrícolas disminuye en primera instancia los ingresos de los residuos orgánicos, la labranza además de mezclar y agitar el suelo, rompe los agregados y expone a la superficie los complejos órgano-minerales, de esta forma se han reportado casos en donde la pérdida de COS a 20 cm en un 50% después del cultivo durante 30 y 50 años (Post & Kwon, 2000).

1.1.6 Deforestación y degradación forestal

La historia deja claro que, en aquellos países en donde abundan los recursos naturales y escasea la población, no se piensa en el futuro y se destina toda la energía a la explotación y el despilfarro de lo que la naturaleza provee en abundancia. En esas condiciones, es normal desperdiciar mucho, y se llega a analizar el aprovechamiento de los recursos de formas más económicas. A medida que crecen la población y la industria, aumenta la demanda de materia prima de todo tipo y la opinión pública empieza a plantearse gradualmente la necesidad de administrar con mayor cautela los recursos naturales. Prácticamente todas las naciones han recorrido el mismo camino. Algunas llegan a este punto antes que otras, pero, inevitablemente, todas acaban encontrándose en la misma situación de la degradación de los recursos naturales (Zon, 1910).

A la fecha, los ecosistemas terrestres sufren un proceso de transformación en respuesta a una sociedad globalizada. La historia de la humanidad es la historia de la utilización de los diversos bosques del planeta para usos múltiples. Los bosques han sido fuente de materia prima para la construcción, el transporte y la comunicación, fuente de alimentos y del combustible necesario para cocinarlos y, una vez talada la superficie boscosa, donde se llevan a cabo explotaciones agrícolas y establecimiento de ciudades (FAO, 2012).

Los bosques ocupan actualmente cerca de 4, 000 millones de hectáreas, que representan cerca del 31 % de la superficie del planeta (FAO, 2010). El aumento progresivo de la población y la actividad económica ha venido acompañado de una mayor capacidad humana de manipular la naturaleza. Esta manipulación se traduce en el desmonte de terrenos boscosos. La deforestación (el desmonte orientado a destinar los terrenos a otros usos o dejarlos abandonados sin uso) es una de las modificaciones antropogénicas de la superficie terrestre más generalizadas e importantes en los diferentes paisajes. Se estima que a lo largo de 5 000 años la desaparición total de terreno forestal en todo el mundo ha ascendido a 1 800 millones de hectáreas, lo cual supone un promedio neto de pérdida de 360 000 hectáreas al año (Williams, 2002).

El crecimiento demográfico y el auge de la demanda de alimentos, fibra y combustible han acelerado el ritmo de desmonte hasta el punto de que en los últimos 10 años el promedio anual neto de desaparición de bosques llegó a los 5,2 millones de hectáreas (FAO, 2010). Esta dinámica de la deforestación a escala mundial ha ido aproximadamente a la par del crecimiento demográfico, si bien el ritmo de la deforestación superaba al crecimiento de la población antes de 1950 y este empezó a disminuir desde entonces mientras que las tasas de deforestación y crecimiento demográfico coinciden en otros aspectos: ambas suelen diferir de una región del mundo a otra y, normalmente, aumentan en períodos de desarrollo económico y se estabilizan o incluso disminuyen cuando una

sociedad ha alcanzado cierto nivel de riqueza, se presenta una fuerte correlación positiva entre los grandes cambios de las sociedades y los usos que se hace sistemas forestales.

Las empresas no talan los bosques por un capricho destructivo o por estupidez. Por lo general, lo hacen porque la información de mercado, que toma en consideración las subvenciones, la tributación, los precios fijados y la reglamentación estatal, así como el régimen de tenencia de tierras y los derechos de uso, indica que se trata de algo lógico y rentable. La deforestación resulta a menudo rentable y lógica porque, por lo general, sus costos no repercuten en las empresas que desmontan la tierra con fines agrícolas ni en las que explotan y venden la madera. Estos costos suelen recaer más bien en la sociedad, las generaciones venideras y, con frecuencia, los hogares pobres de zonas rurales cuya supervivencia y seguridad cotidianas dependen habitualmente de los recursos y servicios ofrecidos por los bosques (TEEB, 2010).

De esta manera el uso de los recursos en este caso específico los bosques puede tomarse como prototipo de la llamada “tragedia de los comunes” de Hardin (1968) en donde la degradación del ambiente puede esperarse siempre, ya que cuando muchos individuos utilizan simultáneamente un recurso escaso o poco abundante. Imaginando un pastizal abierto a todos; la estructura de esta situación desde la perspectiva de un productor ganadero. Cada pastor recibe un beneficio directo por sus animales (que

pastan allí) y enfrenta un costo posterior por el deterioro de los bienes comunes cuando su ganado y el de otras personas pastan en exceso. Cada pastor se siente impulsado a introducir más y más animales porque recibe el beneficio directo de sus propios animales y carga únicamente con los costos resultantes del sobrepastoreo. Hardin concluye que ahí está la tragedia. Cada hombre se encuentra atrapado en un sistema que lo obliga a aumentar su ganado sin ningún límite, en un mundo que es limitado. La ruina es el destino hacia el cual todos los hombres se precipitan, persiguiendo cada uno su propio interés en una sociedad que cree en la libertad de los bienes comunes.

Hardin no fue el primero en advertir de la tragedia de los comunes. Hace mucho Aristóteles observó que lo que es común para la mayoría es de hecho objeto del menor cuidado. Todo el mundo piensa principalmente en sí mismo, raras veces en el interés común.

En el caso particularizado de México y de sus recursos forestales ocurre algo similar, la deforestación, el cambio en la cobertura y del uso de suelo durante las últimas décadas se ha incrementado dramáticamente, con un panorama poco alentador de las 39, 492 millones de hectáreas de bosque primario ocupadas durante el año de 1990 sólo se conservan 34, 310 millones de hectáreas para el año 2010 con una tasa anual de cambio de - 44, 000 ha/año (FAO, 2010). De esta manera cifras de la Global Forest Watch (2013) indican que México se encuentra en el quinceavo lugar a

nivel mundial al perder durante el período 2001-2013 2, 414, 392 hectáreas de bosque. Encabezando la lista los estados de Campeche con 403, 899 hectáreas y Quintana Roo 335, 869 hectáreas mientras que en Michoacán las hectáreas que se perdieron durante este período son 38, 663 mientras que el Estado de México perdió 4, 020 hectáreas (Tabla 2).

Tabla 2. Pérdida en la cobertura forestal en México (Global Forest Watch, 2013)

Lugar °	1	2	3	4	5	13	23
Estado	Campeche	Quintana Roo	Chiapas	Yucatán	Veracruz	Michoacán	Estado de México
Cobertura forestal Mha	5	4	5	3	3	2	689 Kha
Pérdida cobertura forestal ha (2001-2013)	403,899	335,869	328,732	323,838	27,3817	38,663	420
Pérdida cobertura forestal ha (2013)	38,807	26,300	29,565	16,508	18,097	4,500	403
Pérdida cobertura forestal ha (2008)	31,837	28,859	28,535	17,070	19,235	4,739	286
Pérdida cobertura forestal ha (2001)	22,278	14,254	20,058	31,561	19,625	4,010	779
Ganancia cobertura forestal ha (2001-2012)	108,639	98,139	44,180	163,769	88,722	5,016	517

Así la situación de los bosques de México es marcada por la realidad social, creando una tendencia al cambio de usos de suelo y degradación forestal (CONAFOR, 2008). De acuerdo con los Resultados del IX Censo Ejidal 2007, existen en el país 31,518 ejidos y comunidades agrarias que poseen en conjunto 105 millones de hectáreas que pertenecen a 5.6 millones de ejidatarios y comuneros. Del total de ejidos y comunidades existentes en México, 15,381 tienen predios con más de 200 hectáreas con cobertura forestal, que abarcan un total 62.2 millones de hectáreas (Cedrún, 2011). Se estima que 2,994 ejidos que poseen superficie forestal

tienen su principal fuente de ingresos en las actividades productivas relacionadas con estos recursos (INEGI, 2007).

De esta manera quizás, el reto más atrevido lo constituyen los ecosistemas templados; ya que en sus diferentes ecorregiones, se encuentra la más alta concentración y densidad de población del país. Su importancia se puede evidenciar por el hecho de que México se considera como el centro más importante de diversidad y evolución de los pinos y encinos. La protección de los ecosistemas templados deberá tomar en cuenta la importancia de sus servicios ambientales; ya que la mayoría de las ciudades del centro del país, dependen de su existencia como fuentes de recarga de sus acuíferos, superficiales y subterráneos; y de su conservación, también, depende la vida útil, de la mayor parte de los sistemas de riego y la generación hidroeléctrica que existen en el país (De la Maza, 2007).

En 1986 entre los estados de México y Michoacán surgió la necesidad de proteger y conservar estos bosques templados y en especial el fenómeno migratorio de la Mariposa Monarca *Danaus plexippus*, pero fue hasta 10 de noviembre del 2000, por decreto presidencial, cuando se establece como Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca (RBMM) en la región limítrofe del estado de México y Michoacán integradas por tres zonas núcleo que abarcarían un total de 13,581.34 ha y una zona de amortiguamiento que comprendería una área de 42,677.77 ha, en total abarcando una superficie de 56,259.05 hectáreas (Diario Oficial de la Federación, 2000). Para el año 2009, la RBMM fue modificada nuevamente por decreto

presidencial, quedando 13,555.21 hectáreas de zona núcleo y 42,703.84 hectáreas de zona de amortiguamiento con el objetivo de proteger el ecosistema de la salamandra *Ambystoma rivulare* (Diario Oficial de la Federación, 2009).

La región de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca (RBMM), representa un reto para la conservación del patrimonio natural por sus singulares características físicas, geomorfológicas, climáticas, hidrológicas y biogeográficas, pero especialmente porque, año con año, en ella se completa el ciclo migratorio de millones de Monarcas que, con el inicio de la primavera, salen de los sitios de hibernación y reproducción de las latitudes tropicales para dispersarse y poblar los hábitat septentrionales de primavera y verano, de donde nuevamente en el otoño, después de realizar un largo viaje en el que recorren más de tres mil kilómetros, a través de su ruta migratoria desde Canadá, pasando por los Estados Unidos de Norteamérica y las estribaciones de la Sierra Madre Occidental, se establecerán en sus sitios de hibernación en las formaciones elevadas del *Eje Volcánico Transversal* (CONANP, 2001).

Entre las principales problemáticas que la RBMM enfrenta es la deforestación y degradación forestal, una de las principales causas son; la explotación clandestina, o tala ilegal, motivada principalmente por la presión que ejercen varias industrias sobre los recursos forestales, los escasos estímulos para hacer un buen manejo de los bosques, las malas

prácticas de algunos técnicos forestales y la capacidad de la institución correspondiente para combatirlos (Merino & Hernández, 2004).

A pesar de existir una disminución en el cambio de uso de suelo, los procesos de extracción de los recursos forestales continúan (Figura 5). Cabe resaltar que la sociedad científica teme que el fenómeno migratorio de la mariposa monarca esté en riesgo, no sólo por la desaparición de sus sitios de invernación por la tala recurrente año tras año, la pérdida de los sistemas naturales de desarrollo, usos de plaguicidas en terrenos de forma extensiva en los Estados Unidos, sino ahora sean las anomalías climáticas las que podrían estar provocando el retraso de su llegada a los bosques mexicanos (Brown *et al.*, 2012), cubriendo solamente una superficie de 0.67 ha en la temporada 2013-2014 la más baja desde que se dieron tienen registros en 1975 (Rendón & Tavera, 2014).

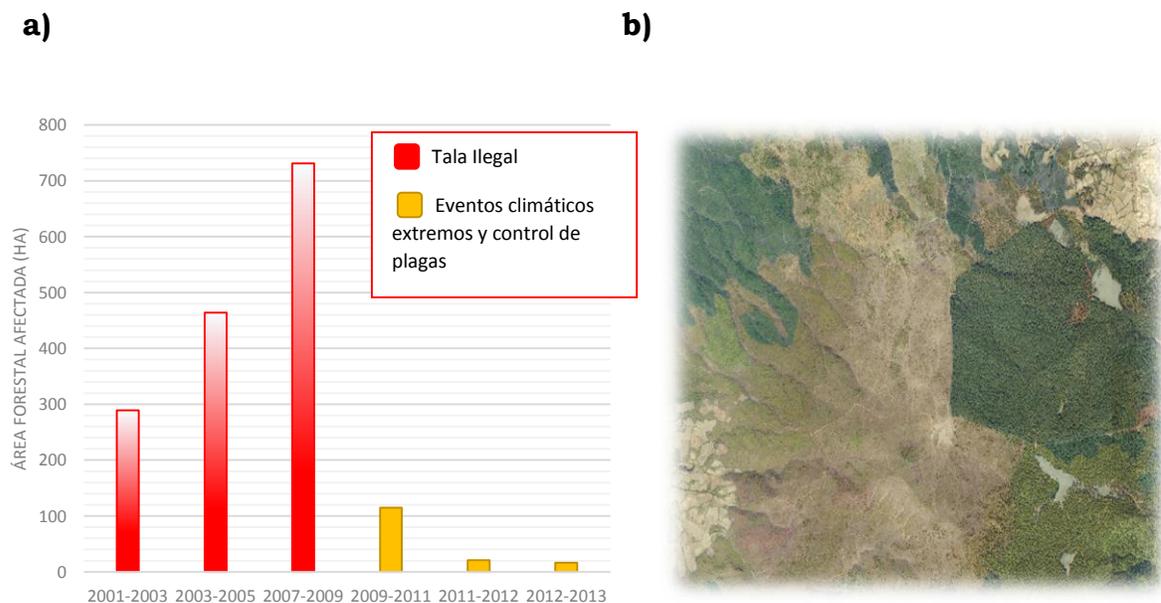


Figura 5 a)Deforestación y degradación en la zona núcleo de Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca (WWF, 2013) b) Ejemplo de deforestación ejido San Cristóbal

1.2 Servicios ecosistémicos

El concepto de “servicios” ofrecidos por los ecosistemas hacia las poblaciones humanas surge a consecuencia del movimiento ambientalista de finales de los años 60 (Mooney & Ehrlich, 1987). En esta época la crisis ambiental empieza a tomar un rumbo de incertidumbres y preocupaciones sobre los impactos sobre el planeta y si puede mantenerse y producir suficientes bienes para ser consumidos por las poblaciones humanas.

El concepto de servicios ecosistémicos emerge de la necesidad de enfatizar esta estrecha relación que existe entre los ecosistemas y el bienestar de las poblaciones humanas. Después de la “Cumbre de la Tierra” en Río de Janeiro en 1992, se enfatizó que a fin de alcanzar la conservación y manejo sostenible de los recursos naturales era necesario generar estructuras que internalicen los costos y beneficios de los procesos productivos en los sistemas de mercado (Montoya *et al.*, 1995).

Existen varios autores que han concordado en tener una perspectiva económico-ecológica, que se basa basada en la cuantificación de los bienes y servicios ambientales y, asignarles un valor (mercantilización de la naturaleza). Sin embargo, es hasta a fines de los años 90, cuando un grupo de ecólogos y economistas trabajaron en colaboración para asignarle un valor a los servicios de la naturaleza. Ellos calcularon que los servicios prestados por la naturaleza tenían un valor aproximado de 33 trillones USD por año (Constanza *et al.*, 1997).

A la fecha existen múltiples definiciones del término servicios ecosistémicos, según Daily (1997) son las condiciones y procesos a través de los cuales los ecosistemas naturales, y las especies que los conforman, sostienen y nutren a la vida. El Millennium Ecosystem Assessment (2005) define a los servicios como todos los beneficios que las poblaciones humanas obtienen de los ecosistemas. Por otro lado Body & Banzhaf (2007) siguieron definir a los servicios como los componentes de la naturaleza que son directamente consumidos, disfrutados o que contribuyen al bienestar humano.

Para el caso de México, la definición que se atribuye a los servicios ambientales según la Ley General del Equilibrio Ecológico y La Protección al Ambiente “los beneficios tangibles e intangibles, generados por los ecosistemas, necesarios para la supervivencia del sistema natural y biológico en su conjunto, y para que proporcionen beneficios al ser humano”, mientras que la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable los define como “aquéllos que brindan los ecosistemas forestales de manera natural o por medio de su manejo sustentable, tales como: la provisión del agua en calidad y cantidad; la captura de carbono, de contaminantes y componentes naturales; la generación de oxígeno; 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 esta manera, los bosques han adquirido mayor importancia por su participación en la regulación del CO₂ atmosférico uno de los principales gases de efecto invernadero, visto entonces como un servicio ecosistémico manteniendo la calidad del aire, el gas carbónico del aire se presenta en una concentración de 0.03 % (300 mmol por mol de aire), siendo la única fuente de carbono para las plantas, las cuales lo capturan incorporándolo a sus tejidos (Goudriaan, 1992).

Como se mencionó anteriormente, los bosques ocupan actualmente unos 4,000 millones de hectáreas, que representan cerca del 31 % de la superficie del planeta (FAO, 2010) y constituyen grandes depósitos de carbono. Comparados con otros ecosistemas terrestres (sistemas agrícolas o praderas), estos tienen entre 20 y 100 veces más contenido de carbono por unidad de área (Maser, 1995).

Para el caso de México, cuenta con una superficie cubierta por vegetación forestal de 138 millones de hectáreas lo que representa un 71% de la superficie nacional, la cual está distribuida en 19% con matorrales en zonas áridas, 11% en zonas semiáridas, 15% a selvas bajas, altas y medianas, 17% a bosques templados, 8% a otros tipos de vegetación y 1% a bosque mesófilo de montaña y manglar (CONAFOR, 2013).

Se estima que la cantidad de carbono en los bosques y selvas de México se ubica entre 4,361 y 5,924 millones de toneladas (Gibbs *et al.*, 2007). Es decir, los bosques y selvas de México almacenan una cantidad de carbono

equivalente a 11-15 años de sus emisiones anuales. Sin embargo, la degradación y pérdida de las coberturas vegetales merman la capacidad y dinámica de almacén de carbono, la acumulación de carbono orgánico producida por la regeneración forestal es un tema en discusión, no obstante varios autores han demostrado que se genera un almacenamiento importante de carbono en el suelo por el establecimiento de vegetación secundaria en tierras abandonadas (Lal, 2005).

Cuando las tierras agrícolas dejan de ser cultivadas, la vegetación secundaria se desarrolla, los materiales orgánicos al suelo aumenta y el carbono orgánico puede volver a acumularse en el suelo a niveles similares a los del bosque primigenio (Silver *et al.*, 2004; Health & Smith, 2000).

A pesar de presentarse recuperación de la vegetación al establecerse bosques secundarios como lo menciona Hernández *et al.*, (2006) el suelo es un subsistema fundamental del ecosistema forestal con características físicas, químicas y biológicas decisivas en su fertilidad, que a su vez determinan sus propiedades y los cambios que ocurren a través del tiempo, así como la influencia por efecto del cambio de uso del suelo. De esta manera el cambio de uso forestal por el agrícola provoca cambios en el suelo llegando a afectar propiedades intrínsecas de los mismos en algunos casos irreversibles.

1.2.1 Mecanismos de pago por captura de carbono

Los programas de captura de carbono (CC) son instrumentos de política que fueron diseñados para aprovechar el mecanismo ecológico descrito anteriormente a favor de la protección ambiental y del combate a la contaminación y, por ende, al cambio climático. Hay dos ideas principales detrás del concepto de los programas de CC:

- Las actividades económicas que llevan al crecimiento de las sociedades, incluso siendo extremadamente eficientes, no se pueden realizar a un nivel cero de emisiones.
- Hay diferentes actividades que se pueden llevar a cabo para disminuir la concentración de carbono atmosférico.

La disminución en esta concentración atmosférica puede ser el resultado de evitar emisiones (bosques que no son talados) o la captura del carbono atmosférico (absorción por almacenes naturales).

De esta manera, las empresas emisoras de CO₂ pueden "compensar" el efecto negativo de las emisiones de sus actividades económicas mediante la inversión o compra de "créditos" en proyectos cuyo resultado sea la captura del carbono que se halla en la atmósfera (Bustamante & Gallegos 2009).

El Protocolo de Kyoto es un instrumento internacional, aceptado en México el 9 de junio de 1998, ratificado por el Senado el 7 de septiembre de 2000 y entró en vigor el 16 de febrero del 2005, el cual tenía como objetivo

reducir los niveles de las emisiones de CO₂ en 5.2 % referentes a 1990, para la segunda etapa que comprenderá 2013-2020 con objetivos en conjunto de reducir en 20% los niveles de CO₂ con respecto a 1990.

A partir de entonces, en México se implementan estrategias para alcanzar las metas y poder reducir las emisiones de CO₂ a la atmósfera, en donde se considera al pago por servicios ambientales *PSA* como pieza medular para mantener la calidad de los ambientes, entendiendo al pago por servicios ambientales como una transacción voluntaria sobre un servicio ambiental bien definido, o una forma de su de la tierra que asegure el servicio, entre un comprador y un proveedor que cumpla con la condición de continuar con el suministro del servicio (Herbert, 2010).

Desde el año de 2003, la Comisión Nacional Forestal, estableció el esquema de *PSA* en las modalidades de hidrológicos, y el Programa para Desarrollar el mercado de Servicios Ambientales por Captura de carbono y los Derivados de la Biodiversidad y para Fomentar el establecimiento y Mejoramiento de Sistemas Agroforestales (*PSA-CABSA*) desde el año 2004. Para el año de 2006 los dos programas se fusionaron bajo un solo concepto Servicios Ambientales, en 2010 la categoría *CABSA* se convirtió en el proyecto de Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación Forestal (*REDD*), para finales del 2011 se separa en un departamento independiente. Después del 2012 el *PSA* se integró como una estrategia de conservación dentro del Programa Nacional Forestal (*Pronafor*) (*CONAFOR*, 2013).

Sin embargo, a pesar de existir un respaldo internacional en cuanto al mercado de bonos de carbono existe una fuerte crítica al respecto en primera instancia por no existir un consenso sobre el control internacional del comercio de emisiones ni sobre los medios de verificación de las supuestas reducciones de gas de efecto invernadero, además de cuestionarse acerca de sus implicaciones al tratar de implementar una dominación al Sur con proyectos impuestos, se discute también alrededor del tema pues esta forma de abordar el problema es peligrosa ya que los programas de compensación no cuestionan en absoluto la ética de consumo destructora que hace divagar la economía basada en energías fósiles. Estas iniciativas solo alivian moralmente a los consumidores de combustibles fósiles mientras que los verdaderos cambios necesarios y esperados para un desarrollo sustentable se redefinen ideológicamente o se consideran proyectos quimeras y son rechazados (Bachram, 2007).

Se cuestiona que el proyecto de Kyoto permite a los países industrializados, en su carrera hacia los créditos ligados a los proyectos de almacenes de carbono, acceder cada año a tierras, y su consumo incontrolado repercute en el Sur transformando áreas forestales en monocultivos convirtiéndolos en vertedero de carbono para el uso del mundo industrializado. Los países pobres, son tan pobres que aceptan recoger los restos. Los países ricos lo saben y se aprovechan de ello (Khan, 2007). Sin embargo, la valoración per se de los servicios ambientales en este caso de la captura de carbono por los diferentes ecosistemas, es

necesaria para la concientización sobre la función de los bosques y como repercuten en la vida y desarrollo de la sociedad actual.

El desarrollo del comercio de las emisiones significa un desvío de recursos y del preciado tiempo por esta razón no se dedica a otras soluciones que podrían emprenderse en verdad en contra del cambio climático. Se necesita diez años para establecer el programa de mercado de carbono, para entonces los gobiernos nacionales habrán gastado millones para poner en práctica sus programas internos con el fin de preparar el mercado internacional. Se constituirán intermediarios, consultores, ONG, empresas, firmas de relaciones públicas y otras firmas de consultoría que ofrecen “ciencia en venta” con vistas a la nueva economía del carbono (Bachram, 2007).

Si bien el tema de los almacenes de carbono, y en particular el pago por este servicio ambiental, es complicado de abordar por sus implicaciones sociales, ambientales, culturales y económicas. Para el caso de México se sigue considerando que el mercado de los Mecanismos de Desarrollos Limpios es una opción importante económicamente hablando, pues esto podría traducirse en ingresos de más de 480 millones de Euros anuales (Monroy, 2009), aunque seamos un contenedor más de carbono del Sur y la problemática ambiental quede parcialmente resuelta, estos ingresos ayudarían a promover el desarrollo social y la conservación de los ecosistemas, incluyendo el desarrollo de la sociedad local tanto en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca como en el resto del país.

En lo que refiere al área comprendida dentro de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca las actividades sobre la conservación, restauración han implicado por parte del gobierno federal un apoyo en total de 248. 10 mdp durante el período 2007-2013. La creación del Fondo Monarca como una estrategia de conservación con base a incentivos económicos para ayudar a conservar la región, mediante un fondo patrimonial se ha integrado 7.3 millones de dólares gestionados por el Fondo Mundial para la naturaleza y el Fondo mexicano para Conservación de la Naturaleza, A.C. provenientes de la Fundación Packard, la entonces Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP), y los gobiernos del Estado de México y Michoacán (CONAFOR, 2013).

Del año 2000 al 2009 el Fondo Monarca apoyo a los propietarios dentro de la ANP con un monto de 26 millones de pesos, definiendo un pago anual de 12 dólares por hectárea anual boscosa bien conservada, en 2009 terminan los permisos por aprovechamiento forestal, sólo permanece el pago por conservación basado en la superficie de los núcleos agrarios y en la participación de los propietarios en actividades de conservación, restauración y protección de los bosques en la zona núcleo de la reserva (CONAFOR, 2013).

La asignación del pago se asigna a través del monitoreo de cobertura forestal en donde se requiere la obtención de 300 fotografías aéreas complementado con un análisis social donde se generan indicadores de

desempeño de conservación el cual ha permitido evaluar y priorizar las acciones de conservación y restauración para la asignación de PSA (García, 2005).

La segunda etapa 2009-2018 el FMCN y CONAFOR firman un convenio de colaboración durante 10 años, este compromiso aporta 33.9 millones de pesos por parte del FMCN y 27.9 millones por la CONAFOR ahora se beneficia con un pago de 683.6 pesos por hectárea de bosque conservado superior considerando más del 50% ocupado por bosque.

Sin embargo, no se reporta PSA por captura de carbono en ninguno de sus núcleos agrarios, lo que puede estar directamente vinculado con la falta de información y la heterogeneidad de métodos para su estimación, a la fecha dentro de la RBMM sólo se han realizado tres estudios sobre el potencial como almacenes de carbono, al sur de la reserva en San Juan Xoconusco (Pérez, 2009) se realiza un análisis de la distribución espacial de estos reservorios bajo diferentes escenarios de manejo del bosque, mientras que para el trabajo en la Región Sierra Chincua se hizo una comparación entre el almacén de carbono en bosques conservados y bosques secundarios (Velázquez, 2012) y una comparación a nivel Área Natural Protegida por Cruz (2011).

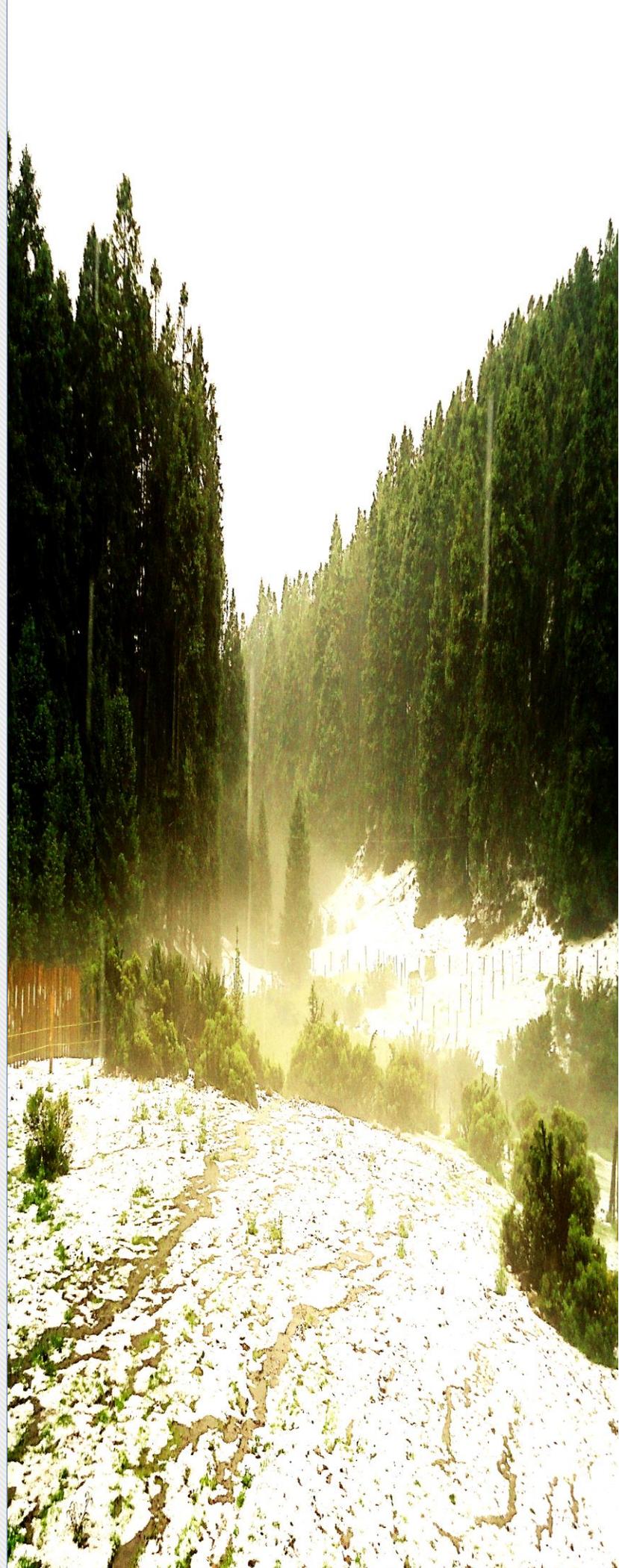
Capítulo II

RESERVA DE LA BIOSFERA

MARIPOSA MONARCA

MICROCUCENCA

RÍO LA PLANCHA



2.1 Localización microcuenca del río La Plancha

El área en estudio de esa investigación queda comprendida en los límites marcados por la microcuenca del río La Plancha la cual se localiza en la región noreste de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca en el estado de Michoacán (Figura 6). En la microcuenca se encuentran los municipios de Senguio, Angangueo, Ocampo y Aporo. La Microcuenca tiene una superficie de 4231.7 ha de las cuales 615.31 ha están dentro de la zona núcleo, 1958.3 ha en la zona de amortiguamiento y 1748.09 ha quedan fuera del área natural protegida ANP.

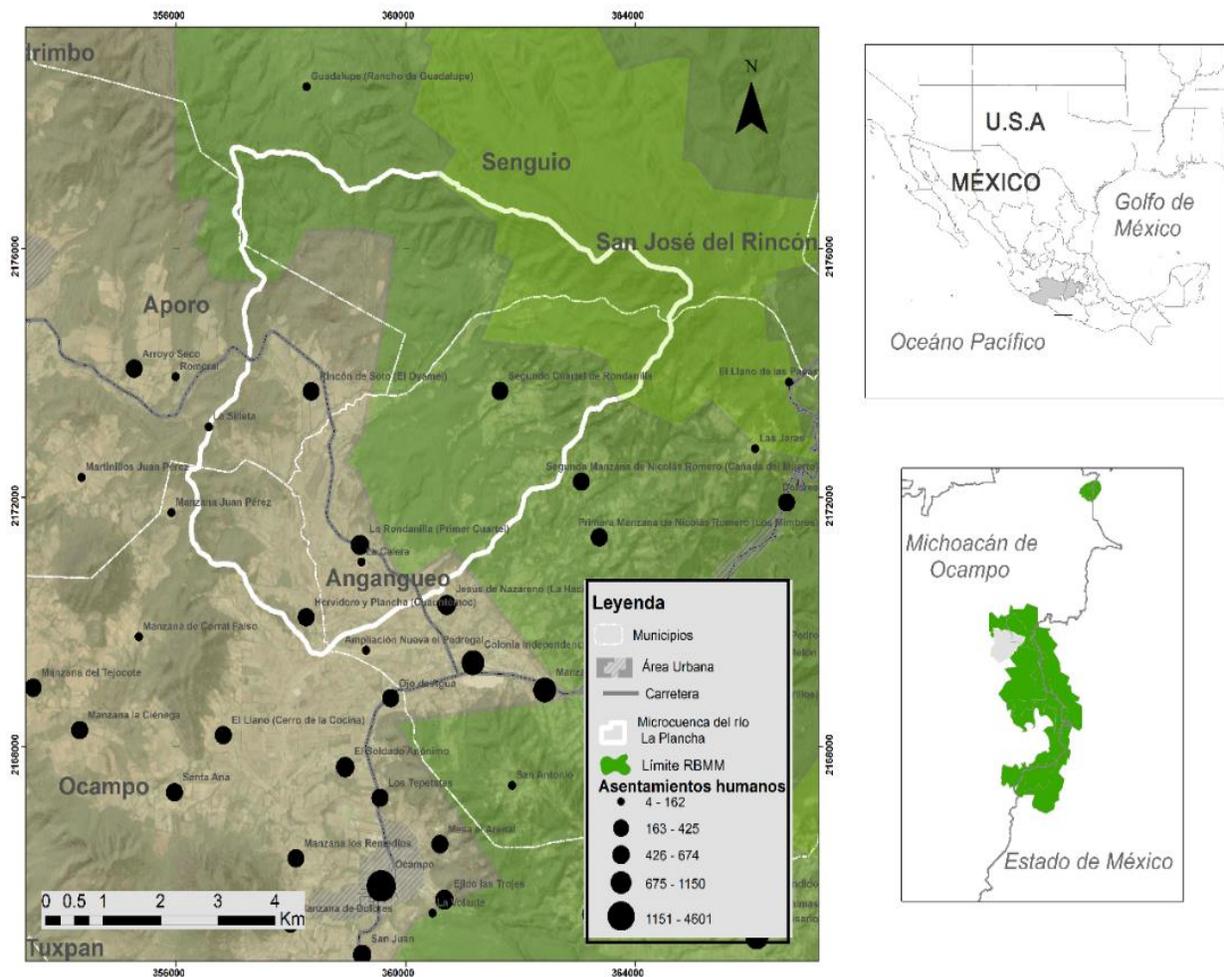


Figura 6. Mapa localización de la microcuenca del río La Plancha

A continuación se presentan información referente al ambiente biofísico y antrópico, destacando aquellas variables relacionadas con el contenido de carbono y el desarrollo del suelos propuestas por Jenny (1941); relieve, material parental, tiempo, clima, vegetación y organismo.

2.2 Geología

La zona volcánica de la parte central de México conocida como Eje Neovolcánico Trasmexicano (Moosser, 1972), constituye uno de los rasgos más característicos de la geología de México por su orientación con respecto a la Fosa de Acapulco, la cual marca la zona de subducción de la placa de Cocos debajo de la Placa Norteamericana, mecanismo que origina los magmas andesíticos de dicho Eje Neovolcánico (Demart, 1978). Con lo que respecta al vulcanismo se considera que tuvo lugar plio-cuaternario, donde la mayoría de la actividad volcánica se produjo durante los últimos 2 millones de años.

Así mismo, se establece la distinción entre las rocas oligo-miocénicas que pertenecen a la secuencia efusiva de la Sierra Madre Occidental y el vulcanismo reciente que corresponde al Eje Neovolcánico. Demart (1976) y colegas distinguen cinco partes principales, definidas por su orientación y características vulcanológicas peculiares, la tercera de esta corresponde a Michoacán donde más abundan los volcanes del cuaternario en México, la distribución de los conos permite inferir la existencia de líneas de fracturas

NE-SW. Esta región se entiende al norte hasta el Bajío, y está limitada al este por el anticlinorio de Tzitzio y las fallas San Miguel de Allende Taxco.

Con lo que respecta a la microcuenca del río La Plancha, pertenece al complejo Sierra Chincua en el estado de Michoacán, en la parte noreste y este está formada en gran medida por la unidad andesítica de Angangueo (Ts-A), que representa la manifestación masiva con que se inicia la actividad volcánica de la zona, tratándose de un macizo conformado por varios aparatos volcánicos de composición andesítica con textura porfídica y en algunas partes característica por materiales microcristalinos. La edad de esta andesita corresponde al Mioceno según dos fechamientos radiométricos realizados al sureste de Angangueo (17.6 y 13.1 Ma. K/Ar, CFE, 1992). En la porción centro occidental aflora una unidad constituida por brecha andesítica (Tm Bva). En la zona occidente los materiales característicos son los recientes depósitos de acumulación aluvial (Qal) representados por eventos del Holoceno (Servicio Geológico Mexicano, 2000).

GEOLOGÍA DE LA MICROCUENCA DEL RÍO LA PLANCHA

Clave	Entidad	Era	Período	Origen	Tipo	Edad
Ts(A)	Roca	Cenozoico	Terciario superior	Ígnea extrusiva	Andesita	17.6 y 13.1 ma
Ts(Bvi)	Roca	Cenozoico	Terciario superior	Ígnea extrusiva	Brecha volcánica intermedia	5.333 y 7.24 ma
Q(al)	Suelo	Cenozoico	Cuaternario	Suelo	Aluvial	0.0117 ma
Ts(A-Bvi)	Roca	Cenozoico	Terciario superior	Ígnea extrusiva	Andesita-Brecha volcánica intermedia	5.333 y 7.24 (?)ma

SIMBOLOGÍA

- Área en estudio
Microcuenca del río La Plancha
- Localidades
- Curvas de nivel
Equidistancia 20m
- Fallas
- Red hidrográfica

INFORMACIÓN GEODÉSICA

Proyección.....UTM
Datum horizontal.....NAD27
Zona.....N14
Meridiano central.....-99°
Meridiano base.....Greenwich

FUENTES

INEGI Carografía vectorial Geología 1:250000, Conjunto topográfico vectorial curvas de nivel Equidistancia 20m, Red Hidrográfica vectorial 1:50000, Servicio Geológico Mexicano Carta Geológico-Minera Anagangueo E14-A26.

Elaboró
Mavial Sarai Velázquez
Quintana

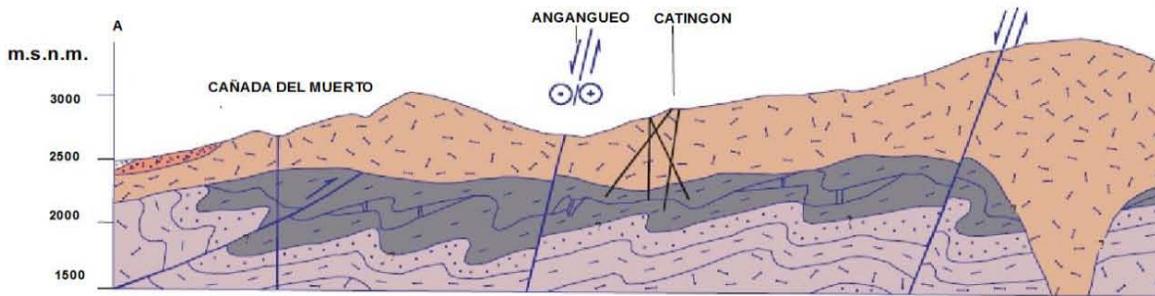
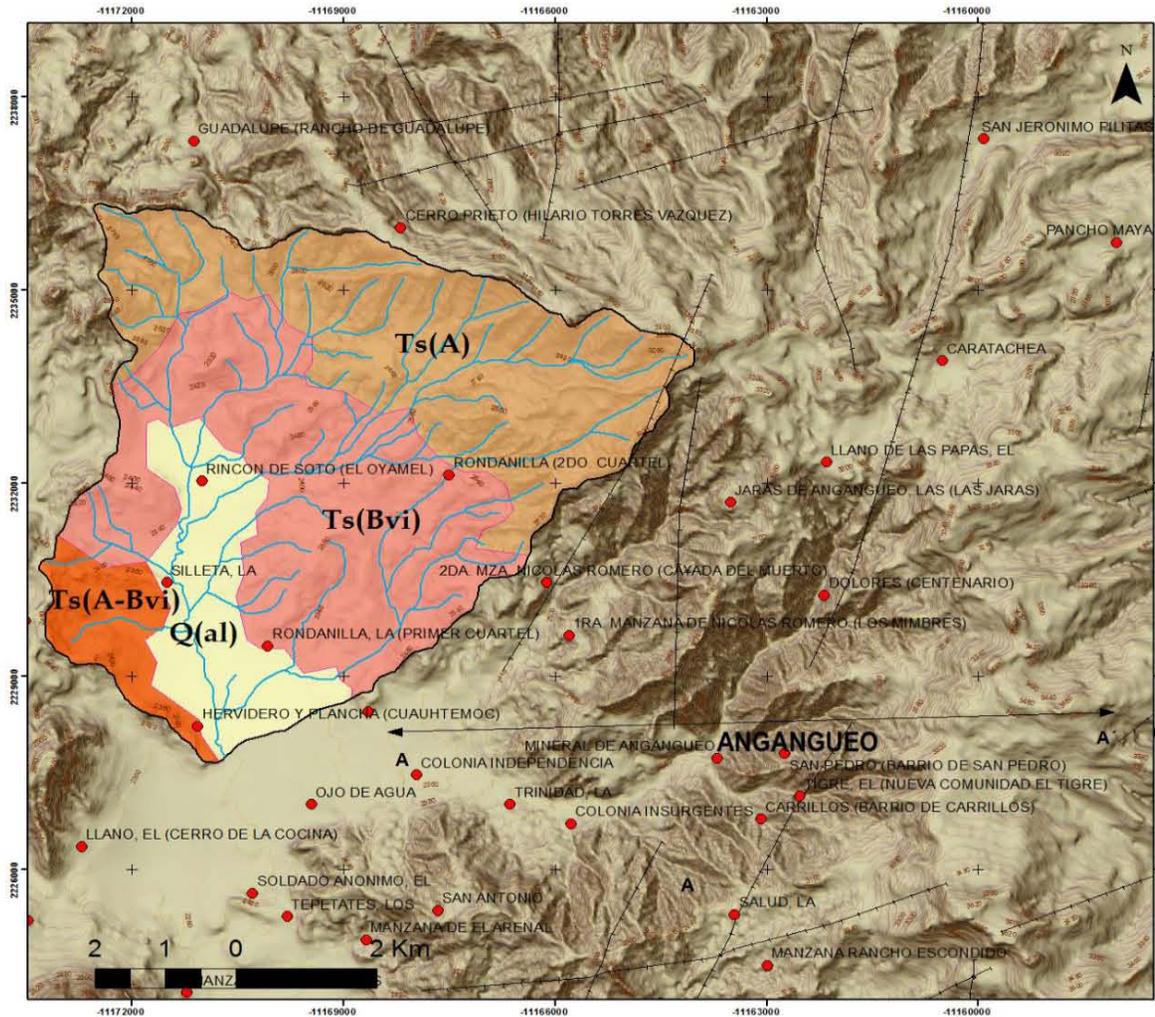


Figura 7. Geología microcuenca del Río La Plancha Michoacán

2.3 Clima

La región de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca presenta en general un clima Cw, templado subhúmedo con lluvias en verano, temperaturas medias anuales de 8° a 22° C, precipitaciones promedio desde 700 mm hasta 1250 mm y temperaturas mínimas para el mes más frío de entre -3° y 18° C. Este tipo de clima cambia en distancias relativamente cortas debido a la presencia de montañas, sierras y relieves escarpados que dan lugar a cambios contrastados en altitud, exposición o pendiente y producen importantes variantes microclimáticas, muy sensibles, sobre todo, en lo que se refiere a grados de humedad, así como en índices de precipitación (Hinojosa, 2004).

En la actualidad son más frecuentes las anomalías climáticas en las diferentes regiones del país; para el caso del estado de Michoacán, los modelos propuestos bajo diferentes escenarios (A2 “pesimista”, B1 “optimista” A1b “intermedio”) la temperatura promedio en general incrementará en comparación de la temperatura contemporánea (20.3 °C analizada durante el período 1960-1990) en 1.4 °C para el año 2030, en 2.2 °C para el año 2060 y en 3.4 para el año 2090. En cuanto a la precipitación se espera una disminución del 88% para el año 2030, para el año 2060 la disminución representara un 14.1% y para el año 2090 se presentara menos 24.9% con respecto al clima contemporáneo (909 mm analizada durante el período 1960-1990) (Sáenz *et al.*, 2009). A nivel regional en la superficie ocupada por la Reserva de la Biosfera Mariposa

Monarca bajo un estudio temporal de 1976-2004 Ruíz (2009) reporta que la temperatura promedio no presenta variaciones importantes y tiende más a la homogenización. Sin embargo, los cambios con tendencias al aumento de la temperatura estarían representando una disminución de la producción de cultivos agrícolas, de forrajes, producción frutícola y ponen en peligro a los santuarios de la mariposa monarca.

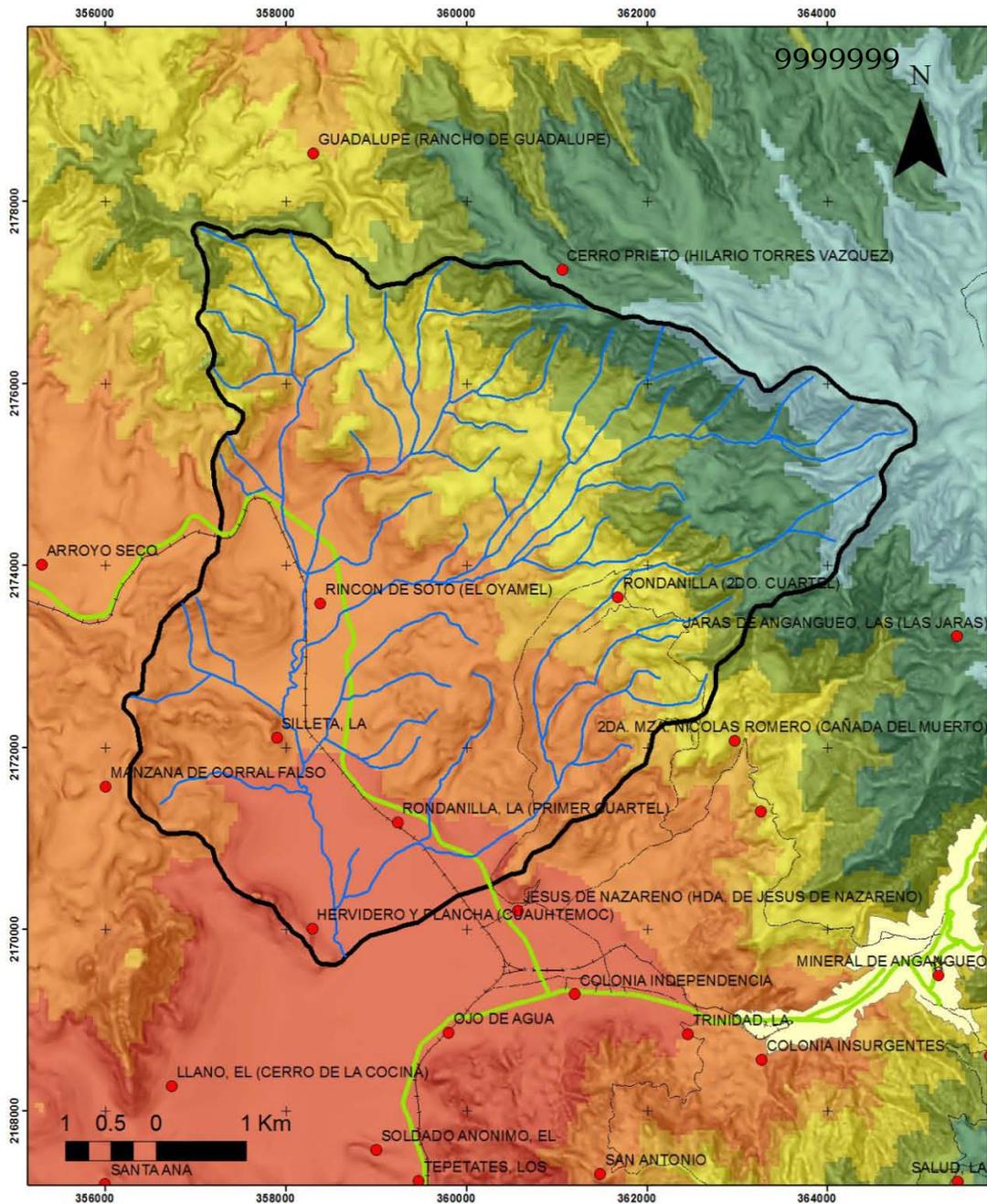
2.3.1 Temperatura media

Con lo que respecta a la temperatura en la región se encuentran temperaturas que pueden analizarse en tres grupos considerando temperaturas media, máxima y mínima promedio. La temperatura oscila entre los 10.7 °C y los 25.1 °C (Ruíz, 2009).

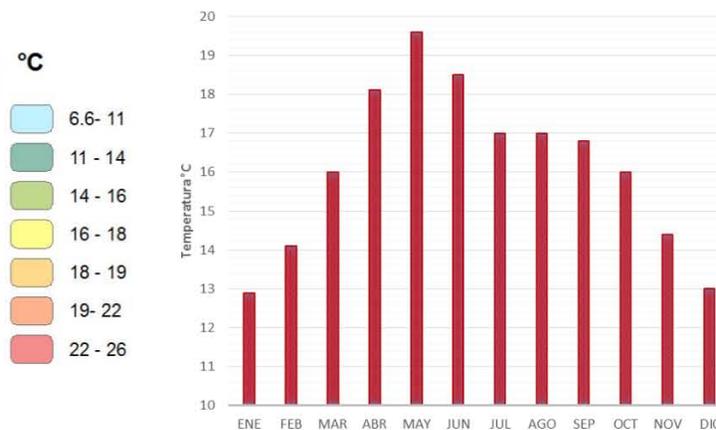
La Tabla 3 muestra algunas de las estaciones climáticas que influyen las variables climáticas de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, para el caso específico de la Micro cuenca del Río la Plancha las más cercanas son Monarca I, Monarca II, Senguio, Melchor Ocampo y Laguna de Fresno, considerando al rango de temperaturas de 9° a 26 °C.

Tabla 3. Clasificación por tipo régimen térmico (tomado de Ruiz, 2009)

CLAVE	NOMBRE	ALTITUD	MEDIA ANUAL	CLIMA	SÍMBOLO	CATEGORÍA
15107	SANTA BARBARA, STO TOMAS	1152	24	CÁLIDO	A	<1500
15201	TROJES, SANTIAGO TEMOAYA	1200	13	TEMPLADO	C	
16058	JUNPAGEO, JUNPAGEO	1430	24	CÁLIDO	A	
15030	IXTAPAN DEL ORO	1680	18	SEMICALIDO	(A)C	1500-1700
15046	PRESA COLORINES (CFE)	1680	19	SEMICALIDO	(A)C	
15054	MALINALCO, MALINALCO	1740	21	SEMICALIDO	(A)C	1700-1900
16036	EL BOSQUE, ZITACUARO	1750	19	SEMICALIDO	(A)C	
16099	PRESA TUXPAN, TUXPAN	1771	18	SEMICALIDO	(A)C	
15130	PSA.VALLE DE BRAVO, V.B	1869	19	SEMICALIDO	(A)C	
16020	CIUDAD HIDALGO	2020	17	TEMPLADO	C	1900-2100
16061	LAGUNA DEL FRESNO	2070	17	TEMPLADO	C	
15108	SANTA MARÍA DEL MONTE	2210	13	TEMPLADO	C	2100-2300
16121	SENGUIO	2260	16	TEMPLADO	C	
16079	MELCHOR OCAMPO	2300	26	CÁLIDO	A	2300-2500
15301	TEXCALTITLAN D-7	2349	16	TEMPLADO	C	
16002	AGOSTITLAN, CD. HIDALGO	2380	14	TEMPLADO	C	
16097	PSA PUCUATO, CD HIDALGO	2505	14	TEMPLADO	C	2500-2700
15005	AMANALCO DE BECERRA	2511	14	TEMPLADO	C	
15353	BUENA VISTA (ESTACIONV.)	2576	18	TEMPLADO	C	
15088	SAN FRANCISCO OXOTOTIPLAN	2635	13	TEMPLADO	C	
16071	LOS AZUFRES, CD HIDALGO	2800	11	SEMIFRÍO	C(B')	<2700
15197	CUESTA DEL CARMEN	2800	14	TEMPLADO	C	
15174	PALOS MANCORNADOS	2920	12	SEMIFRÍO	C(B')	
	MONARCA II	2970	10	FRIO	D	
	MONARCA I	3255	9	FRÍO	D	



TEMPERATURA MEDIA DE LA MICROCUENCA DEL RÍO LA PLANCHA



SIMBOLOGÍA

- Área en estudio
- Microcuenca del Río la Plancha
- Traza Urbana
- Localidades
- Camino Pavimentado
- Terracería
- Vía ferrea
- Red hídrica

INFORMACIÓN GEODÉSICA

Proyección.....UTM
 Datum horizontal.....NAD27
 Zona.....N14
 Meridiano central.....-99°
 Meridiano base.....Greenwich

FUENTES

Interpolación de la temperatura media considerando el gradiente altitudinal empleando datos de las estaciones climáticas Monarca I, Monarca II, Senguio, Melchor Ocampo y Laguna de Fresno

Elaboró
 Maviel Sarai Velázquez
 Quintana



Figura 8. Temperatura media de la microcuenca del río La Plancha Michoacán

2.3.2 Precipitación

La precipitación, de las estaciones climáticas anteriormente mencionadas, varía de los 693 mm a los 1208 mm en el área en estudio, la precipitación es un factor de suma relevancia para la formación, interviniendo el modelado del relieve y el avance de la pedogénesis, así los parámetros tienen un efecto importante en la acumulación de C en el suelo a una escala regional (Burke *et al.*, 1989, Wang *et al.*, 2005; Xiong *et al.*, 2014) en particular en los Andosoles el clima representa uno de los principales formadores de suelo a través de su influencia sobre las tasas de intemperismo químico (Shoji *et al.*, 1993). Con lo que respecta a la estación climática Senguio (2260 msnm) presenta el mes más lluvioso es julio con 235.6 mm mientras que el más seco es febrero con sólo 5.6 mm (Figura 9).

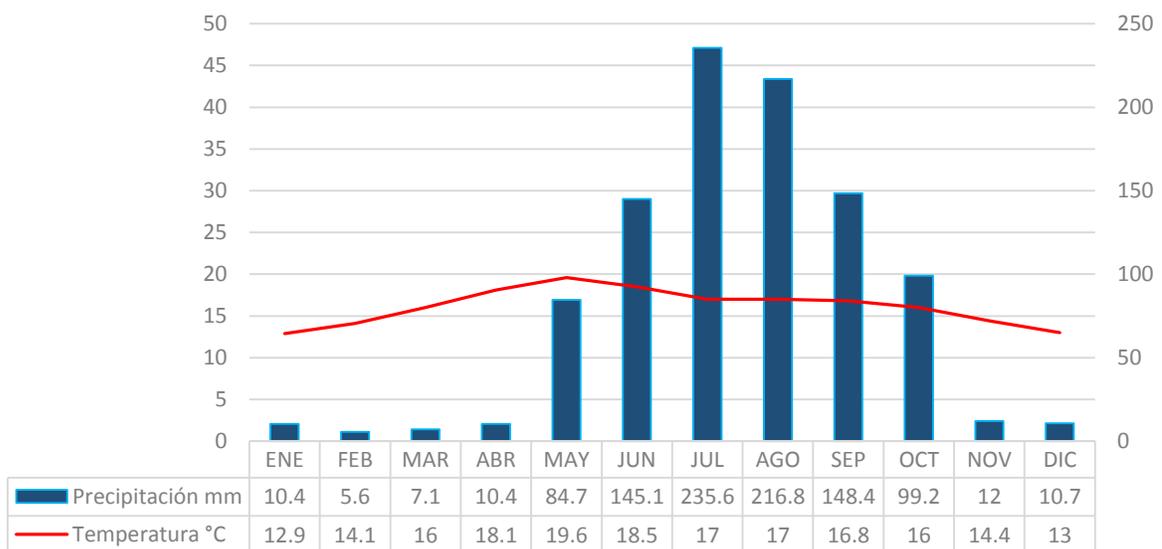
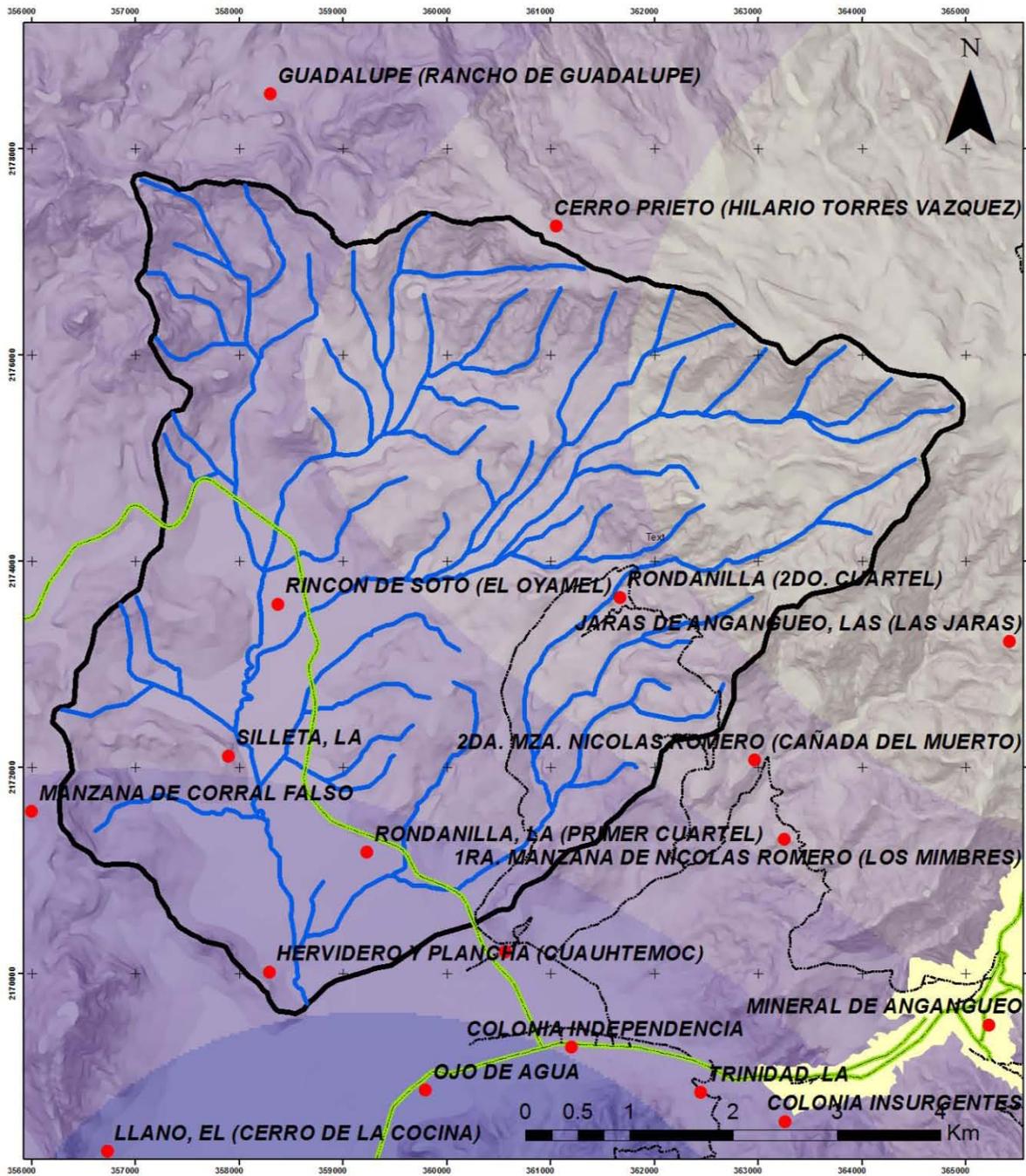
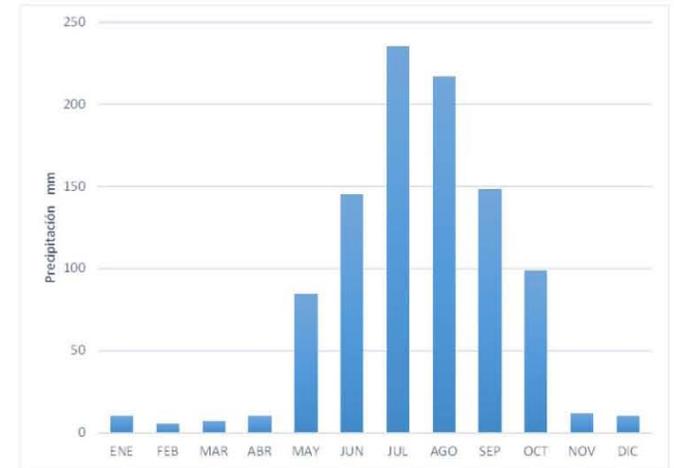


Figura 9. Diagrama ombrotérmico de la estación Climática Senguio a 2260 msnm



PRECIPITACIÓN MEDIA DE LA MICROCUENCA DEL RÍO LA PLANCHA



SIMBOLOGÍA

Precipitación mm



INFORMACIÓN GEODÉSICA

Proyección.....UTM
 Datum horizontal.....NAD27
 Zona.....N14
 Meridiano central.....-99°
 Meridiano base.....Greenwich

Elaboró
 Maviel Sarai Velázquez
 Quintana



Figura 10. Precipitación microcuenca del Río La Plancha Michoacán

2.4 Edafología

Los suelos en la microcuenca se asocian al tipo de material parental en donde la formación de los suelos responde tanto a los intensos y acelerados procesos de descomposición de la abundante materia orgánica, como a la composición litológica de la zona que incluye andesitas y brecha volcanica que determina la presencia predominante de andosoles nortee de la cuenca se encuentra Andosol distico asociado con Luvisol, cromico, mientras que en la region este se ecuentra la asociacion de suelos Andosol distico y Andosol vitrico, mientras en la parte oeste de la cuenca los suelos son Vertisoles, Luvisol y Phaeozem y, por último, en la parte baja de cuenca se presentan suelos Luvisol crómico y Leptosoles (INEGI, 2009).

2. 5 Vegetación

Según Rzedowski (2006), la reserva ocupa porciones de la provincia florística de Depresión del Balsas. La flora es rica en general y es evidente el dominio de las especies herbáceas. Algunos géneros como representativos son *Eupatorium*, *Senecio*, *Stevia* y *Muhlenbergia*, presentan aquí un importante centro de diversificación. Desde el punto de vista florístico el área forma parte de una zona de transición entre las regiones Neártica y Neotropical adscrita a la provincia de las Serranías Meridionales, pertenecientes a la Región Mesoamericana de Montaña, lo cual se expresa en la enorme biodiversidad de la zona (CONANP, 2001).

Los principales tipos de vegetación o asociaciones en la reserva son los siguientes:

Bosque de oyamel se distribuye desde los 2 400 hasta 3 600 msnm. Es la comunidad más representativa de la zona núcleo, ocupa importantes extensiones del subsistema montañoso y las partes altas de los aparatos volcánicos, se caracteriza por la predominancia de *Abies religiosa* y constituye el hábitat característico de la mariposa monarca. En las áreas perturbadas, principalmente en las laderas, se desarrolla un estrato arbóreo inferior con presencia de especies como *Quercus*, *Alnus*, *Arbutus*, *Salix* y *Prunus*, entre otros.

Bosque de Pino - Oyamel se localiza en una franja altitudinal entre los 2 400 y 3 000 msnm pero su distribución horizontal se extiende por casi toda la región. El primero constituido por *Abies religiosa* y especies del género *Pinus*; el segundo por especies como *Arbutus grandulosa*, *Salix paradoxa*, *Alnus firmifolia* y *Quercus spp*, en el estrato herbáceo destacan especies como *Senecio prenanthoides*, *S. tolucanus*, *S. sanguisorbae*, *Acaena elongata*. Esta asociación se presenta en cañadas y laderas, en Sierra Chincua y Cerro Chivatí-Huacal

Bosque de Pino se presenta en manchones aislados, la mayor parte de ellos se desarrollan a altitudes entre 1 500 y 3 000 msnm asociados a los sitios más húmedos o en declives fuertes, como es el caso de las cañadas, por debajo de los 2 000 msnm., en el primer caso predomina el *Pinus*

pseudostrobus, en suelos más someros o en condiciones secas se da lugar a asociaciones de *Pinus rudis* y *P. teocote*, así como *P. oocarpa* y *P. michoacana* en las partes medias y bajas más escarpadas.

Bosque de Encino está asociado a procesos de sucesión en áreas desprovistas de su vegetación originaria, por lo que se distribuye debajo de la cota de los 2 900 msnm aunque en algunos lugares se llega a encontrar hasta los 3 100 msnm y en general se encuentra compartiendo su espacio con pequeños manchones de cipreses.

Comunidad Quercus-Pinus. Se encuentra en Cerro Altamirano y rodeando una sección *Pinus-Abies* en la zona de Cerro Pelón. El estrato arbóreo se compone de *Pinus pseudostrobus*, al que se le asocian *P. rudis*, *P. montezumae*, *P. michoacana*, *P. tenuifolia* y *P. leiophylla*, intercalándose también elementos aislados de *Quercus rugosa*, *Q. laurina*, *Arbutus xalapensis*, *A. glandulosa*, *Alnus firmifolia*, *Salix spp.*, *Cupressus lindleyi*, *Buddleia sp.* Incluye dos estratos arbóreos, de los cuales el más bajo es ocupado por el encino. Los niveles inferiores incluyen varias especies de las familias *Asteraceae* y *Poaceae*.

Bosque de Cupressus. Se ubica en pequeñas áreas exclusivamente en Cerro Pelón con pendientes moderadas, y de 2,500 a 3,000 m s.n.m. en cañadas. Se trata de árboles de 15-35 m de altura, generalmente asociados con pino. Son comunes los bosques mixtos entre los tipos de

vegetación antes descritos. Algunas de las especies que se reportan en la reserva es el *Cupressus lusitanica*.

2.6 Aspectos socioeconómicos

Los habitantes dentro la microcuenca del río La Plancha en total son 1,836 los cuales están establecidos en las localidades rurales en el municipio de Angangueo se encuentran las localidades de Primer Cuartel de La Rondanilla con 566 habitantes, el Segundo Cuartel de Rondanilla 314 habitantes y La Calera con 117 habitantes. Para el municipio de Aporo está la localidad Rincón de Soto 370 habitantes y La Silleta con 43 habitantes por ultimo en el municipio de Ocampo solo se presentan una localidad Hervidero y Plancha con 425 habitantes (INEGI, 2010). De esta forma se destaca tanto por criterios demográficos como culturales y socioeconómicos la zona de influencia de la región es eminentemente rural.

2.6.1 Actividades económicas

Las principales actividades económicas que se llevan a cabo en la región son agricultura, aprovechamientos pecuarios, actividad forestal y minería (CONANP, 2001).

Agricultura

El cultivo de la tierra constituye la práctica productiva más arraigada entre las comunidades de la zona, tanto por que representa en la cultura regional la garantía de reproducción biológica y social de las familias, como por que el conocimiento tradicional de los ciclos agrícolas, de las

características físicas y la fertilidad natural del suelo y de los fenómenos meteorológicos aplicados a la producción de alimentos básicos, ha sido transmitido y actualizado por generaciones y es parte fundamental de los saberes y capacidades. La milpa se presenta generalmente como un monocultivo de maíz, con rendimientos mínimos de 600 kg y máximos de dos toneladas por hectárea, así mismo aparece muy poco asociada a cultivos de calabaza, chile o frijol, lo que indica la pérdida de patrones tecnológicos de agricultura tradicional. La producción de algunas hortalizas y frutales gozan de una importancia menor y se desarrollan generalmente en traspatios por las unidades domésticas de cierto nivel de capitalización.

Los cultivos que se producen con riego son, además del maíz, trigo, avena forrajera, haba, aguacate, durazno, papa y chícharo, entre otros. El aguacate se siembra en una superficie de 609 hectáreas; sin embargo, actualmente su cultivo se ha dificultado debido al incremento en los costos de producción y al estancamiento de los precios de venta. Destacan además, el cultivo de papa en la comunidad indígena de Donaciano Ojeda, donde se estima que la superficie sembrada es de 50 hectáreas y se obtienen cosechas entre 20 a 25 toneladas por hectárea.

Aprovechamientos pecuarios

La producción de bovinos se destina básicamente al autoconsumo, trabajo del campo y mínimamente a su venta en el mercado local. Las variedades más comunes de ganado son las criollas, que representan la mayoría y se manejan en las áreas donde hay pastizales nativos y el ganado mejorado, del que sólo disponen algunas familias para la producción de leche principalmente y que se maneja en los terrenos de cultivo en descanso. La ganadería ya sea de ovinos o de bovinos, cumple principalmente dos funciones en la economía familiar: constituye un sistema de ahorro que permite a la familia enfrentar situaciones de emergencia y proporciona alimentos y algunos productos susceptibles de comercialización.

Actividad forestal

En la década de los años cincuenta los bosques de la región en los estados de México y Michoacán estuvieron sujetos a una veda forestal que propició el crecimiento de la explotación clandestina, dos decenios después se instalaron industrias forestales que constituyeron el eje rector de la economía de la zona. Actualmente, la Reserva es vecina de dos de los mercados más importantes de productos forestales: el Distrito Federal y el Estado de México, cuya demanda de materias primas es superior a la capacidad productora sostenida de recursos forestales la cual opera con maquinaria y equipo obsoleto, una insignificante integración vertical de la producción, una escasa generación de productos con valor agregado y desvinculada con los propietarios del bosque. Adicionalmente, la falta de

oportunidades de empleo genera la proliferación de aserraderos y talleres, algunos autorizados y otros sin ningún control, lo que a su vez, eleva la demanda de materia prima

De esta manera, se contextualiza la problemática social en la región de influencia de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, en donde la decisión de decretar como Área Natural Protegida los sitios donde hiberna y se reproduce la mariposa Monarca, coincidió con el cierre de las principales fuentes de empleo regional como fueron: la Compañía Minera de Angangueo, los viveros frutícolas Cariflor y las instalaciones industriales de la Unión de Ejidos Melchor Ocampo, que ofrecían un total 1,170 empleos. A estos factores debe añadirse, para los ejidos y comunidades indígenas del Estado de México, la promulgación de la veda total para actividades forestales a partir de 1990, la cual fue levantada hasta junio de 1995. Aunque en diferentes proporciones la combinación de estos acontecimientos afectó severamente el equilibrio, de por sí precario, de la economía de los ejidos y comunidades indígenas de la zona.

De esta forma los habitantes en la zona enfrentan dos desafíos por un lado la exigencia por parte del gobierno federal por conservar los recursos en especial del bosque y por otro lado la necesidad de aumentar sus ingresos a corto plazo.

Capítulo III

METODOLOGÍA GENERAL



3.1 Método y materiales

En la actualidad, son diversos los métodos empleados para la evaluación de almacenes de carbono en sistemas forestales; sin embargo, no hay una estandarización a nivel global. Para el caso de México, al unirse al Protocolo de Kyoto en el 2000 le compromete a cumplir los lineamientos como se estipula en su artículo 5° fracción II “Las metodologías para calcular las emisiones antropogénicas por fuentes y la absorción por los sumideros de todos los gases de efecto invernadero serán las aceptadas por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el cambio climático (IPCC)”.

Al realizar la revisión de las metodologías que proporciona el IPCC se encontró que están enfocadas esencialmente en la medición del carbono en la biomasa aérea. A nivel nacional según lo decretado en la Ley General de Desarrollo Forestal sustentable es la Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales la encargada de “Definir las metodologías para la valoración de los bienes y servicios ambientales de los ecosistemas forestales”, será a través del órgano descentralizado Comisión Nacional Forestal quien tiene como competencia apoyar la ejecución de programas de bienes y servicios ambientales que generan los recursos forestales.

Para fines de este trabajo se revisaron diferentes métodos y manuales internacionales y nacionales sobre la estimación de reservorios de carbono usando como línea base Guidelines Good Practice Land use and Land-Use

Change and Forestry y la Guidelines for National Greenhouse gas Inventories del IPCC, cabe destacar que la acumulación de carbono en el suelo está influenciada por otros factores en los sistemas forestales como propone Mc Bratney *et al.*, (2003)

$$C_x = f(s, c, o, r, p, a, n) + e$$

En donde C es el carbono almacenado en una posición x y está en función de los factores formadores del suelo (s), el clima (c), los organismos que incluye el uso de suelo, efectos por actividad humana y el manejo (o), relieve (r), material parental (p), edad o tiempo (a) y el error de correlación espacial (e). De esta forma son varios los autores que proponen la necesidad de una previa caracterización del área de estudio optimiza el trabajo de campo, ya que proporciona mayor agilidad, reduciendo los costos de mediciones y además otorga una mayor confianza en la presentación de los resultados 1) la interacción de procesos geomórficos y bióticos (Ellert *et al.*, 2001); 2) la historia de manejo del suelo (Smith, 2003); 3) la época o temporada (Steeffen, 2003) 4) la pendiente y grado de erosión ; 5) la orientación de ladera y 6) el tipo de vegetación que predomina.

3.2 Fotointerpretación

La fotointerpretación es un tipo de percepción remota, la cual se define como la ciencia y el arte de recopilar y analizar información de un objeto desde determinada distancia. En donde se pueden realizar medidas u observaciones sin tener contacto directo con el objeto en cuestión (Heisey & Kawano, 2001).

La base de la fotointerpretación es conseguir una perspectiva en relieve, la cual se logra por la visión simultánea de los objetos desde dos puntos de vista distintos, el correspondiente a cada ojo, separados por una distancia llamada interpupilar y su coordinación mental. La **Paralaje** de un punto u objeto se puede definir como el desplazamiento relativo que sufre un punto u objeto al ser observado desde distinto ángulo Figura 11 (Albertz, 2007).

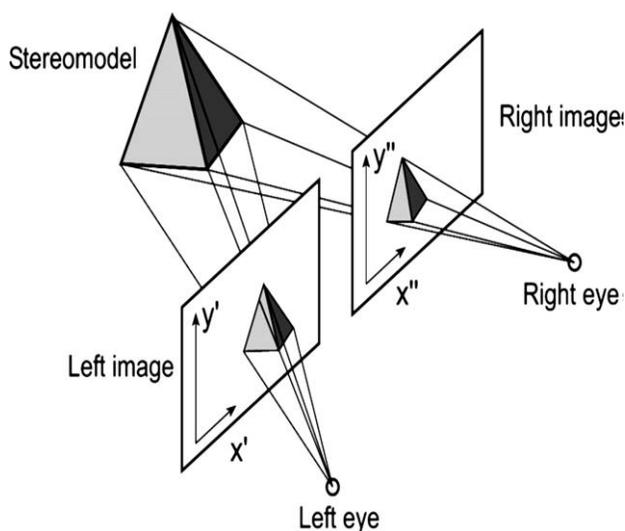


Figura 11. Paralaje o la superposición en fotografías aéreas, Kansas USA (adaptado Albertz, 2007).

De esta manera se plantea que al tomar las fotografías aéreas verticales sucesivas, a una escala aproximadamente constante, separadas a una cierta distancia, con un solape longitudinal del 60% (2/3 partes del terreno fotografiado en la primera está contenido en la siguiente), es posible la visión estereoscópica o en tres dimensiones.

Para este trabajo se realizó la interpretación de las fotografías aéreas que corresponden a los años 1971, 1984, 1994 e imágenes SPOT de los años 2004 y 2015 con la finalidad de localizar aquellas áreas que han permanecido sin cambios en la cobertura forestal, así mismo las que han sido perturbadas y reconocer el tiempo que han estado en estas condiciones. Para poder llevar a cabo la fotointerpretación se requirió del reconocimiento de visual de los objetos a estudiar, a través de diferentes elementos de la imagen como se describen a continuación (Eastaway, 2007).

a) Tono y color: las tonalidades de grises y de color permiten distinguir y reconocer los objetos. El tono o color de la escena, debe ponerse especial atención en el reconocimiento de los contrastes de los diferentes objetos entre sí. El color puede ser importante para identificar el agua, el suelo, vegetación, rocas etc.

b) Formas: las formas naturales tienden a seguir la configuración del terreno, mientras que las formas culturales son a menudo geométricas representadas con líneas rectas, ángulos agudos y formas irregulares.

-
-
- c) Sombra:** las sombras pueden dar pistas para la identificación de objetos, además de ayudar con la percepción de profundidad. Sin embargo, debe tenerse cuidado debido a que el sombreado puede oscurecer características de interés.
- d) Patrones:** la disposición espacial de los objetos discretos puede crear un patrón distinto. De esta manera permite agrupar unidades en el paisaje.
- e) Textura:** esto se refiere a objetos agrupados que son demasiado pequeños o demasiado juntos para poder ser diferenciados como elementos individuales.
- f) Contexto:** la asociación de los objetos con la ubicación del sitio es a menudo importante para ayudar a la interpretación.

La identificación de estos elementos rara vez se reconoce por separado, es la combinación de estos elementos visuales que permite la interpretación de los objetos en cada contexto.

3.3 Selección de los sitios de muestreo

La selección de los sitios de estudio para la evaluación de los almacenes de carbono consistió en realizar un análisis sobre las características del paisaje con un enfoque geopedológico, en donde las relaciones entre geomorfología y pedología pueden inscribirse en el contexto de la ecología del paisaje, en su enfoque de integración donde suministra percepciones y visiones complementarias de la estructura y dinámica de los paisajes naturales y/o antropizados.

El uso de modelos de paisaje ha mostrado que los elementos del paisaje son predecibles y que particularmente el componente geomorfológico interviene en una amplia parte de la variabilidad espacial no-aleatoria en la cubierta pedológica, en este sentido se puede explicar la distribución de los reservorios espacialmente de carbono (Arnold & Schargel, 1978; Wilding & Drees, 1983; Hall & Olson, 1991). De esta forma genéticamente las geoformas cubren tres de los factores de formación de los suelos reconocidos por Jenny (1941), la topografía, el material parental y la edad relativa. Por tanto el contexto geomorfológico es una herramienta particularmente idónea para la cartografía de suelos y para reconocer los procesos pedogenéticos involucrados en la formación de suelos.

La fotointerpretación de los principales paisajes geomorfológicos se basó en Zinck (1979) quien propone la identificación de los siguientes elementos

Piedemonte: porción de terreno inclinada al pie de unidades de paisaje más elevadas. Su composición interna es generalmente heterogénea e incluye:

Colinas y lomas desarrolladas en el substrato pre-cuaternario, expuesto por exhumación después de que la cobertura aluvial del cuaternario ha sido removida por erosión.

Abanicos y glacis, a menudo en posición de terraza (abanico-terrace, glacis-terrace), compuestos por material detrítico del cuaternario transportando por torrentes desde terrenos altos circundantes.

Lomerío: porción de terreno quebrada, caracterizada por una repetición de colinas redondeadas o lomas alargadas, con cumbres a alturas variables, separadas por una red de drenaje densa y valles coluvio-aluviales.

Montaña porción de terreno elevada, escabrosa, profundamente disectada, caracterizada por alturas relativas importantes con relación a las unidades de paisaje circundantes, disección interna.

Para el caso las vertientes se emplea el modelo de facetas de Ruhe (1960) que usa la ruptura de pendiente como elemento descriptivo principal y el flujo de agua. Entendiendo como superficie cumbral la parte más alta de una elevación (loma, colina, montaña, cadena montañosa), desde la cual se reconoce una disminución de la altitud del relieve hacia todos lados, se caracteriza por ser una zona estable geomorfológicamente, con un alto desarrollo de suelos. Ladera porción inclinada de la superficie terrestre que delimita formas positivas y negativas (Lugo, 2011), el suelo en las laderas son derivados de sedimentos coluviales que son gradualmente transportados pendiente abajo generalmente siguiendo patrones dependiendo de las tasas de erosión, la resistencia que puedan presentar los materiales está en función de la pendiente y la longitud de la ladera (Wysocki, *et al.*, 2000).

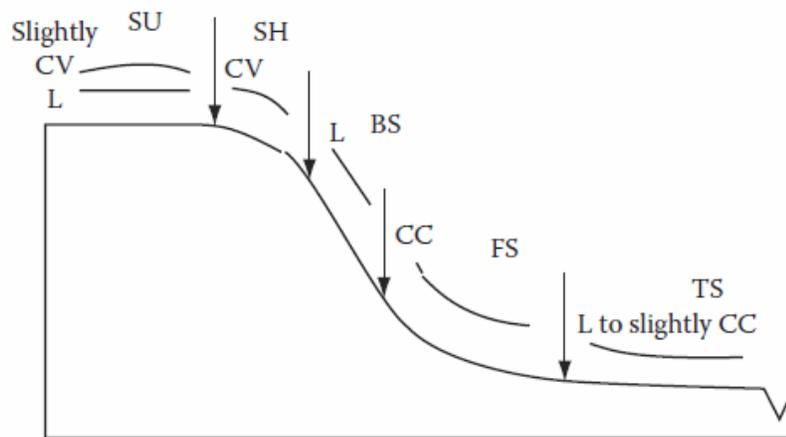


Figura 12. Modelos de vertiente con depósitos laterales SU= superficie cumbrial, SH= hombro de ladera, BS=ladera, FS= falda, TS=pie de vertiente.

3.4 Muestreo para la estimación de carbono orgánico del suelo

El diseño del muestreo consistió en ubicar las parcelas circulares (1000 m²) en las diferentes unidades geomorfológicas y en el centro llevar a cabo la descripción de perfil considerando los horizontes, genéticos ya que estos horizontes reflejan los procesos pedogenéticos (Bridgest, 1997), la descripción se basó en el manual de campo de propuesto por Siebe *et al.*, (2006). Para realizar un inventario, seguimiento de los stocks de carbono orgánico y disminuir también la variabilidad espacial a escala parcela, se realizó la recolecta de tres submuestras dentro de la misma parcela (Smith, 2002).

Para determinar la densidad de cobertura forestal en cada sitio de muestreo se identifica sólo el estrato arbóreo (DAP mayor a 2.5 cm), se tomó la información referente a su diámetro a la altura del pecho DAP (1.3 m), la altura, así como el género de cada árbol.

3.5 Análisis de laboratorio

Preparación de muestras para su análisis

Una vez tomada las muestras en campo se secaron a temperatura ambiente, posteriormente se realizó el molido y tamizado con malla 10 para homogeneizar la muestra. Para las pruebas de Carbono y Nitrógeno total se seleccionó una submuestra de 5 g que se pulverizó con un mortero de ágata y se tamizo en malla 60 de 0.25 mm.

3.5.1 Carbono orgánico del suelo

Para el cálculo de la fracción de carbono en suelo COS, se utilizó el método de Walkley-Black (1934) modificado, que consiste en la oxidación del carbono orgánico que contiene el suelo con un exceso de dicromato de potasio en un medio fuertemente ácido, valorando el exceso de dicromato con sulfato ferroso (ISRIC, 2002).

La densidad aparente que se requiere para calcular el carbono orgánico del suelo se tomó en campo empleando para ello un cilindro de volumen conocido el cual se enterrado en el suelo a la profundidad de cada horizonte y se extrajo completamente lleno con suelo, la muestra fue pesada en húmedo y en laboratorio se secará a 105 °C por 4 hrs para posteriormente volver a pesar (Beaver, 1963).

3.5.2 Valoración del pH

El pH es una propiedad química del suelo que tiene una importancia para procesos como la morfogénesis, procesos químicos y biológicos del suelo. Se estimó a partir del método potenciométrico para determinar pH real desarrollado en agua destilada a una relación 1:2.5.

3.5.3 Aluminio extractable con pirofosfato

La extracción de Al en complejos orgánicos se hizo con pirofosfato de sodio Al_p (Smith, 1994). El Al presente en la solución se determinó mediante un espectrofotómetro a 530 nm.

3.5.4 Color del suelo

El color del suelo refleja algunas propiedades físicas, químicas y biológicas del mismo y ésta relacionado directamente por el contenido de materia orgánica, el material parental, el clima, el drenaje y la aireación. Para determinarlo se utilizó las tablas de color Munsell.

3.5.5 Textura

Se realizó la evaluación de la textura del suelo empleando el método de la pipeta de Robinson, el cual consiste en determinar el porcentaje de arenas, arcillas y limos en un suelo luego de haberlo procesado para eliminarle su materia orgánica y sus enlaces químicos de microagregados.

3.6 Elaboración de la cartografía para la distribución espacial de los principales almacenes de carbono

La cartografía de la distribución de los almacenes de carbono en los en el suelo se llevó a cabo partir de los resultados obtenidos en campo empleando y comparando dos método geoestadísticos Kriging.

El modelo Kriging genera un resultado que considera que la distancia o dirección entre los puntos de muestreo reflejan una correlación espacial que puede ser explicada por la variación en la superficie, este método de interpolación es apropiado usarse cuando los datos son conocidos y se requieren para aplicaciones en la ciencia del suelo y geología. Kriging (con sus variantes), los cuales ofrecen no solo predicciones y superficies de respuesta requeridas, sino también mapas de probabilidades y cuantiles (Johnston *et al.*, 2001). Este método cuantifica la estructura espacial de los datos mediante el uso de variogramas llamados algunas veces semivariogramas. Se asume que los datos más cercanos a un punto conocido tienen mayor peso o influencia sobre la interpolación, influencia que va disminuyendo conforme se aleja del punto de interés (Villatoro *et al.*, 2008).

Capítulo IV

EVALUACIÓN DE LA COBERTURA
FORESTAL MICROCUENCA
DEL RÍO LA PLANCHA



4.1 Evaluación de la cobertura forestal

Los cambios en la cubierta forestal a lo largo de la historia de la humanidad han propiciado degradación en la mayoría de los ecosistemas, razón suficiente para implementar nuevas tecnologías en los monitoreos e inventarios forestales, no sólo para realizar caracterizaciones a detalle de los recursos sino para focalizar mejores medidas de manejo.

Así mismo, la teledetección surge como una herramienta útil para el monitoreo de la cubierta forestal. Pero es a partir de la segunda guerra mundial que las fotografías aéreas se emplean en escala cada vez mayor para conocer la cobertura del suelo y la vegetación. De esta manera, la primera vez que se utilizó la fotografía aérea para inventarios forestales fue en 1919 en Canadá (Rambler *et al.*, 1989) desde entonces se ha desarrollado en el campo forestal .

Las fotografías aéreas ofrecen un rico acervo pues antes de 1970 no existe ninguna otra fuente de teledetección, es por ello que esta larga historia de repetición para evaluar amenazas y cambios a través del tiempo representa una ventaja al momento de realizar un análisis multitemporal (Evans, 2010). Por lo tanto las fotografías aéreas ayudan a reconstruir las condiciones históricas del ecosistema, describiendo el grado de variabilidad dentro del mismo, útil para el desarrollo de estrategias destinadas a la gestión ecológica integral (Landres *et al.*, 1999).

La fotografía aérea es ideal para el mapeo de pequeñas áreas y la percepción de características del paisaje a escala fina, como en las zonas ribereñas o la identificación de árboles individuales (Fensham & Fairfaz, 2002; Touminen & Pekkarinen, 2004) ya que poseen un alto nivel de detalle espacial y radiométrico.

A pesar de existir en el presente diversas plataformas espaciales la falta de imágenes de satélite históricas limita el uso de estos datos en el para la detección de cambios de las últimas tres décadas, además las imágenes de satélite que se encuentran disponibles y sin costos tienen una menor resolución espacial que las fotografías aéreas (Touminen & Pekkarinen, 2004). A pesar de las ventajas que representa el uso de fotografías aéreas existen retos específicos para emplearlas, especialmente se requiere de individuos altamente capacitados, ya que se basa en la experiencia personal, el conocimiento y expectativas que tienen el intérprete de un lugar determinado.

Uno de los retos que se presentan es el desarrollo de métodos automatizados para la clasificación (por lo general, aplicado en imágenes de satélite), en donde se pueda agrupar o separar mediante el tono, color, tamaño, forma, textura (Hay *et al.*, 2003). Así, la clasificación basada en objetos resulta prometedora en el estudio de la vegetación y el análisis del paisaje (Blaschke, 2004). La integración de la información digital del terreno con fotografías aéreas y otras imágenes de teledetección pueden

ampliar la capacidad de mapeo (Florinsky, 1998). De esta forma, a nivel paisaje cierta información como pendiente, orientación y los índices de humedad pueden ser particularmente útiles cuando se combinan con imágenes digitales para la clasificación de la distribución de la vegetación en ambientes heterogéneos (Hoersch *et al.*, 2002).

4.1.1 Dinámica del cambio de densidad de la cobertura forestal y uso de suelo (1971-2015)

La densidad de la cobertura forestal es un importante indicador de productividad y de funcionalidad en los bosques, del crecimiento del arbolado y vigor (Maguire & Kanaskie, 2002), se define como la proporción de la tierra cubierta por la proyección vertical de las copas de los árboles (Howard, 1991; Jennings *et al.*, 1999) Figura 13. La cubierta de copas es la capa superior de vegetación, lo que se traduce en un refugio para lo que viva debajo de ella. Por lo tanto, el dosel regula la cantidad de luz y agua que llega al suelo, influyendo en la temperatura y la humedad, además de adicionar el material orgánico al suelo del bosque (Ludwig, 2002; Seidel *et al.*, 2011). Así es usada como un indicador para identificar y seleccionar los estándares en el manejo sustentable de los bosques.

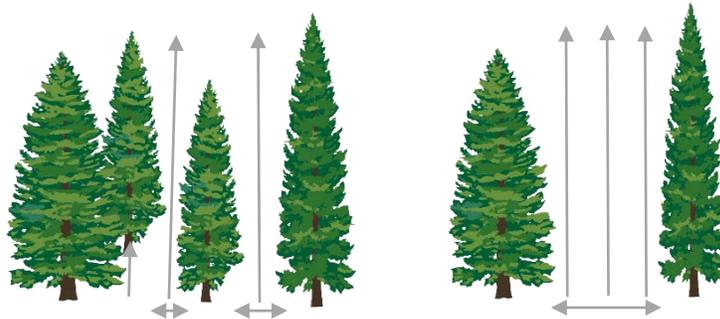


Figura 13. Ejemplo de la densidad de copas de árboles medida en la dirección vertical sobre una superficie.

La densidad de cobertura forestal es un proceso dinámico que puede estar regido por procesos naturales en donde el dosel se abre principalmente por caída de árboles o grandes ramas o bien por la propia diferenciación de la altura del dosel (Van der Meer, 1996). Por otro lado en escala mayor se ve modificada por procesos de remoción en masa, la sucesión ecológica, la invasión de especies exóticas, erupciones volcánicas, incendios y huracanes en donde puede perturbar gravemente gran parte de los bosques (FAO, 2001), también existen otros procesos que pueden afectar la distribución de la densidad de copas que se relacionan con intervenciones antropógenas, la presión social, las principales actividades económicas entre otras.

La densidad del dosel varía dentro de un mismo tipo de bosque según su localización dentro del paisaje, generalmente la perturbación de esta no se da de forma aleatoria ya que existen ciertas áreas en donde persisten los cambios, con frecuencia relacionados con su accesibilidad o con la demanda por el recurso (Van der Meer, 1996).

De esta manera, se empleó en este trabajo a la densidad de cubierta forestal como un indicador clave en la evaluación del estado de conservación de los bosques y su relación con el carbono orgánico del suelo. La evaluación de la dinámica del cambio en la densidad de la cobertura forestal y uso de suelo se llevó a cabo usando fotografías aéreas pancromáticas para los años 1971, 1984 y 1994 del Instituto Nacional de

Estadística y Geografía, para el año de 2004 una imagen SPOT con resolución de 2.5 m/píxel y para el período 2015 se empleó una imagen de satélite multiespectral SPOT6 con una resolución espacial 6 m/píxel y 1.5 m/píxel en pancromático, obtenidas a través de La Estación de Recepción México Nueva Generación (ERMEX NG).

Empleando la fotointerpretación se obtuvieron cinco clases de la densidad de la cobertura forestal y dos usos de suelo, para el caso del 2015 se añaden la categoría flujos de lodo al presentarse procesos de remoción de masa durante este período. La categoría cerrada corresponde a un área forestal que cubra más del 76%, semicerrada 50-75%, semiabierta 26-50%, abierta 11-25% (López, 2011) y para la categoría deforestado se considera aquellas áreas con densidad de arbolado menor al 10% (FAO, 2010).

Densidad de cobertura forestal y cambio uso de suelo 1971-2015

La microcuenca del río La Plancha cubre una superficie en total de 4231.7 ha de las cuales 2822 ha (66.7%) están cubiertas por cobertura forestal, la superficie deforestada abarca 151.1 ha (3.5%) y las zonas agrícolas en total suman 1376 ha (32.5%). De esta manera, se puede destacar la presencia de la agricultura como una actividad predominante dentro de la zona.

La evaluación de la densidad de cobertura forestal durante el período 1971-2015 correspondiente a 44 años de análisis, permitió reconocer cual ha sido la dinámica de cambio, este período se caracterizó por una pérdida

en la cobertura cerrada pasando de 1389.9 ha en el año 1971 a 1002.1 ha en el 2015 lo que indica una degradación de la superficie cubierta por arbolado denso y un aumento de bosque con arbolado semiabierto y abierto (Figura 14). La superficie deforestada también presentó un aumento de 43.21 ha a 151.4 ha durante este período.

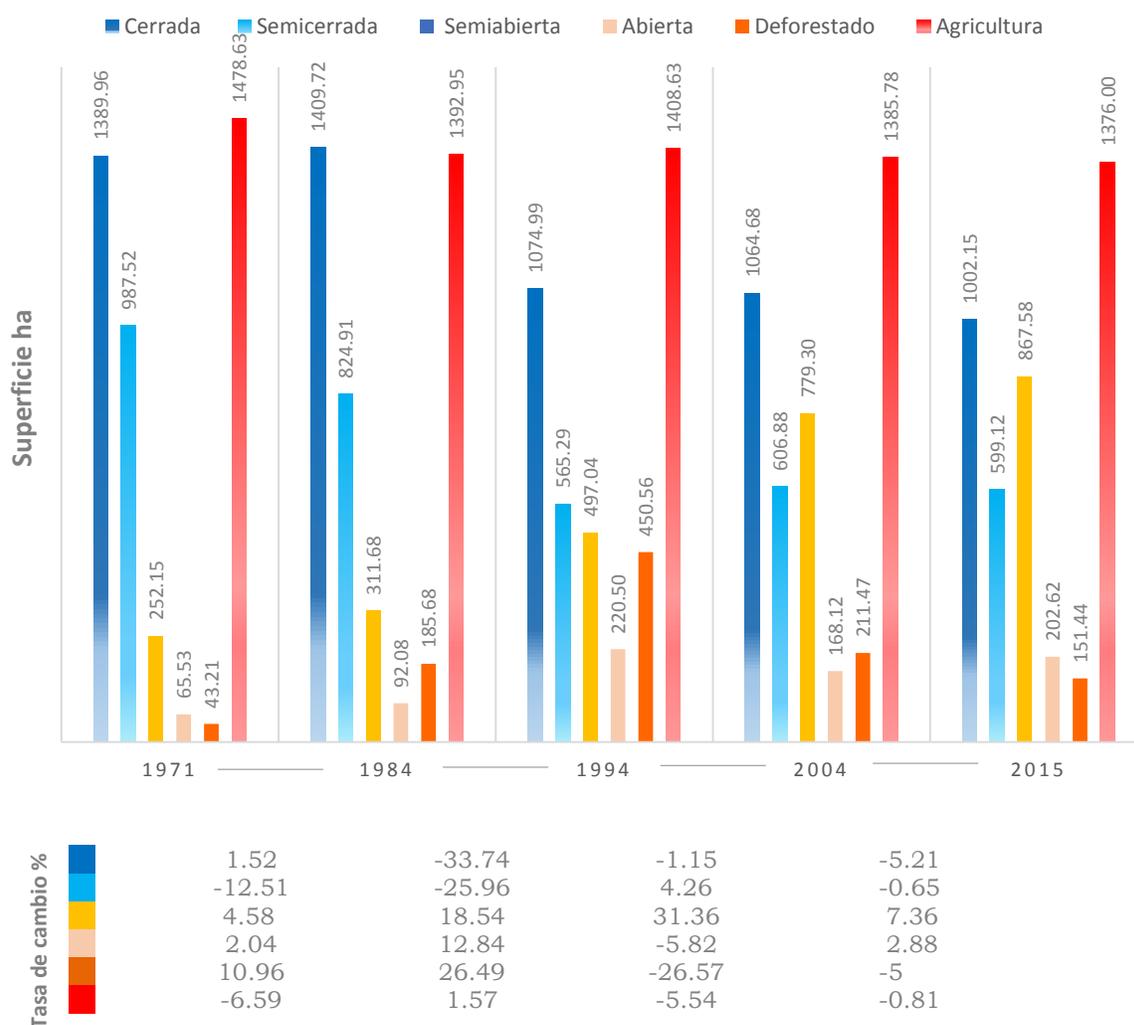


Figura 14. Evaluación multitemporal de la densidad de cobertura forestal y uso de suelo, 1971-2015.

De manera particular, los cambios en la cobertura forestal presentan una diferenciación temporal, encontrándose para el período 1971-1984 un aumento en la superficie con bosque cerrado de 1389.9 ha a 1409.7 ha lo que representa una importante recuperación.

Para entender la dinámica de cambio de la superficie forestal es necesario denotar a este espacio en su contexto histórico, social y político que está influenciado por las políticas nacionales las cuales influyeron e influyen en la gestión forestal tenido un carácter hegemónico, en donde el gobierno federal ha sido el tomador de decisiones, particularmente en esta época 1940-1982 las vedas forestales y concesiones influyendo en el manejo y explotación dentro de la región, presentándose entonces un aumento de la degradación forestal dentro de la cuenca, la cobertura semiabierta se incrementó de 252.15 ha a 311.6 ha mientras que la cobertura abierta pasó de 65.5 ha a 92.1 ha y la superficie deforestada de igual forma presentó un aumento de más del triple de 43.21 ha a 185 ha, relacionado directamente con la formación de La Unión de Ejidos de Melchor Ocampo en donde los vicios de la gestión burocrática de las empresas y recursos campesinos afectaron el capital natural de la región (Merino, 2001). Por otro lado las zonas agrícolas mostraron una importante reducción de 1478.6 ha a 1392.95 ha. Así que este período se caracteriza por presentar pérdidas en su superficie forestal pero algunas zonas agrícolas se recuperaron forestalmente (Tabla 4).

Tabla 4. Matriz de cambio en la densidad de cobertura forestal, microcuenca del río La Pancha

Densidad de cobertura forestal	Cerrada	Semicerrada	Semiabierta	Abierta	Deforestado	Pastizal	Agricultura	Cuerpo de Agua	Flujo de Lodo	Total
1971-1984										
	(ha)									
Cerrada	1409.72	3.51								1413.23
Semicerrada		774.82								774.82
Semiabierta		46.58	254.70							301.28
Abierta			56.98	54.87						111.85
Deforestado				37.21	23.69					60.89
Pastizal					5.84	10.38				16.22
Agricultura					156.15		1392.70			1504.76
Cuerpo de Agua							0.25	4.28		4.53
Total	1409.72	824.91	311.68	92.08	185.68	10.38	1392.95	4.28	-----	4231.67
1984-1994										
Cerrada	1074.68									1074.68
Semicerrada		509.47								509.00
Semiabierta		55.82	461.48							517.30
Abierta			35.56	153.36						188.92
Deforestado				67.13	205.97					273.10
Pastizal					27.80	7.18				34.98
Agricultura					216.79		1408.63			1625.42
Cuerpo de Agua						3.20		4.28		7.48
Total	1074.99	565.29	497.04	220.50	450.56	10.38	1408.63	4.28	-----	4231.67
1994-2004										
Cerrada	1064.68									1064.68
Semicerrada		606.88								606.88
Semiabierta			742.28							742.28
Abierta			37.02	162.59						199.61
Deforestado				5.52	211.47		84.95			312.32
Pastizal						10.38	115.76			126.13
Agricultura							1185.08			1185.08
Cuerpo de Agua								5.07		5.07
Total	1064.68	606.88	779.30	168.12	211.47	10.38	1385.78	5.07	-----	4231.67
2004-2015										
Cerrada	918.84									918.84
Semicerrada	83.31	514.07								597.38
Semiabierta		85.05	604.95							690.00
Abierta			262.64	196.96						459.60
Deforestado				4.66	97.76					102.42
Pastizal				1.00	53.68	10.04				64.72
Agricultura							1373.99			1373.99
Cuerpo de Agua							2.01	5.41		7.42
Flujo de lodo									17.31	17.31
Total	1002.15	599.12	867.58	202.62	151.44	10.04	1376.00	5.41	17.31	4231.67

Durante los años comprendidos entre 1984 a 1994 la cobertura con bosque denso (cerrada y semicerrada) presenta detrimentos por lo que se trata de un período de degradación forestal además de un incremento significativo de superficies deforestadas que abarcan para 1994 un total de 450 ha, hecho relacionado con la extracción de dos décadas en los bosques de alta productividad biológica por parte de La Unión de Ejidos de Melchor Ocampo quienes contaban con maquinaria extractiva e importantes instalaciones industriales, el saldo de sus operaciones fue el deterioro de los bosques de los ejidos, el empobrecimiento y división de los mismos lo que llevó a declararse en quiebra en 1992 (Merino, 2001).

Aunado a esto para el año 1986, por decreto presidencial, se establece la Reserva Especial de la Biosfera Mariposa Monarca REBMM (DOF, 1986) con la perspectiva del conservacionismo gubernamental se buscaba superar las limitaciones de las herramientas de conservación anteriores (parques nacionales), sin tener que realizarse expropiaciones de tierras la REBMM mantiene formalmente los derechos de tenencia aunque se restringen los derechos de uso y el control de tierras lo que genera un ambigüedad en las condiciones de tenencia, visto por las comunidades como una expropiación encubierta (Merino, 2001) lo que genera una presión en el recurso forestal y descontentos entre los dueños de la tierra.

Para el siguiente período de evaluación de 1994-2004 se tiene una pérdida en la superficie con densidad cerrada en la cuenca de 1074.9 ha a 1064.6 ha; sin embargo, comparado con el período anterior se muestra menor tasa anual de cambio. Por otro lado, las categorías semicerrada y semiabierta muestran un incremento, además de cambios positivos se presentan recuperación de zonas deforestadas. Estos cambios en la degradación forestal no sólo se reportan en la cuenca en estudio sino en general dentro de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca (López, 2011; Dival, *et al.*, 2012; Manzo *et al.*, 2014).

Para los años que comprenden de 2004-2015 se presentan pérdidas en la cobertura cerrada 1064.68 a 1002.1, mientras que la categoría semiabierta presenta importante incremento, pero las categorías deforestada y agrícola tienen disminución en superficie lo que se traduce en un aumento de áreas en recuperación. Este período se caracteriza por tener procesos de remoción en masa reportado en el año de 2010 cubriendo 17.3 ha dentro del área e estudio.

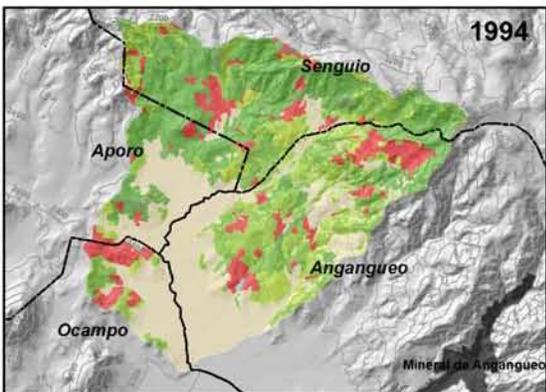
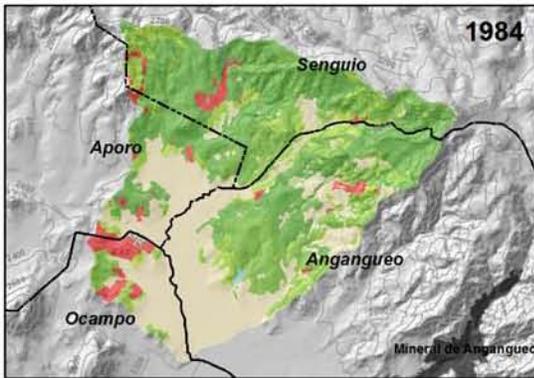
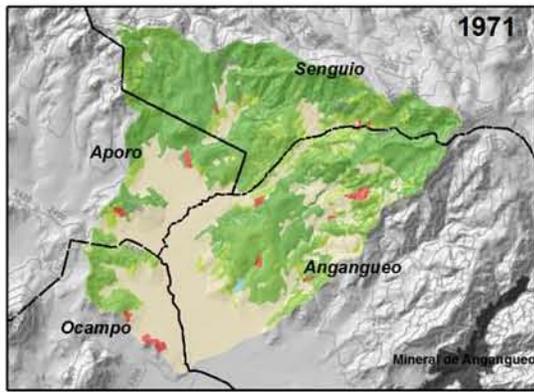
Comparando los resultados con algunos trabajos realizados dentro de la reserva se puede distinguir que a partir del decreto de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca en 2000 la degradación de los bosques y deforestación en la región se genera por una confusión en la expansión de la RBMM y el establecimiento de pago por servicios ambientales sin un consenso que incluya a todos los involucrados (López, 2011); sin embargo,

los esfuerzos a partir del período 2007-2012 por parte de Fondo Monarca, CONAFOR y SEMARNAT en el cumplimiento por pagos por servicios ambientales se ha traducido en la disminución de la deforestación a gran escala dentro de la región (Vidal *et al.*, 2012).

4.1.2 Distribución espacial de la densidad de cobertura forestal y cambio uso de suelo microcuenca río La Plancha

Espacialmente, la microcuenca del río la Plancha abarca cuatro municipios; al este y sur se ubica el municipio de Angangueo 1833.7 ha, al oeste está representado por Aporo 676.7 ha, mientras que Ocampo abarca la parte oeste y sur con 400 ha, y Senguio cubre el norte y este con 1320.6 ha, destacando así al municipio de Angangueo como el de mayor superficie. Cabe mencionar la presencia del santuario de Mariposa Monarca Sierra Chincua dentro de los municipios Angangueo y Senguio.

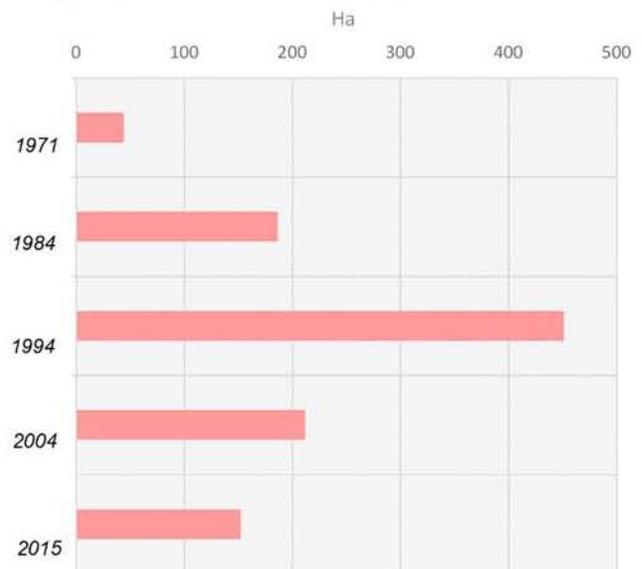
Como se puede observar en la Figura 15 la dinámica de cambio no sólo presenta heterogeneidad temporal sino también espacial, así las superficies deforestadas dentro de la cuenca presentaron su máximo en el año de 1994 (450.5 ha) concentradas en Senguio y Angangueo, mientras que en los períodos anteriores las superficies deforestadas fueron considerablemente menores en los diferentes municipios. Ya en los años 2004 y 2015 algunas de estas áreas deforestadas durante 1994 permanecen igual y otras inician procesos de recuperación.



Leyenda

Municipios	Cerrada	Pastizal
Área Urbana	Semicerrada	Agrícola
Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca	Semiabierta	Cuerpo de agua
	Abierta	Flujo de lodo
	Deforestado	

Superficie deforestada en el período 1971-2015



Elaboró Maviael Sarai Velázquez Quintana

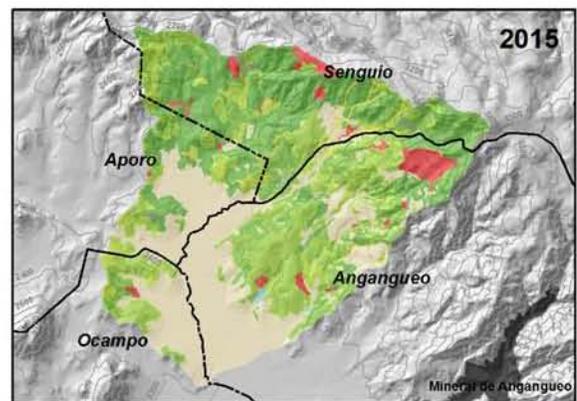


Figura 15. Mapa del cambio de densidad de cobertura vegetal y usos de suelo 1971-2015, microcuenca río La Plancha, Michoacán

De esta forma, durante el período de análisis los diferentes municipios han tenido ganancias y pérdidas, para el caso particular de Angangueo su cobertura cerrada en 1971 era de 405.8 ha, su cobertura semicerrada de bosque abarco 475.7 ha cifras importantes ya que alberga el santuario de Mariposa Monarca Chinchua; sin embargo, cabe destacar que una importante superficie presenta bosque semiabierto 106.5 ha y áreas agrícolas 791.82 lo que evidencia con un importante grado de degradación. Estas características no presentan grandes cambios hasta 1994 cuando hay una disminución importante en la cobertura cerrada a solo 140.6 ha y un aumento significativo de áreas deforestadas abarcando para entonces 185.5 ha. Sin embargo, para 2004 y 2015 se recuperan cubriendo solo 133.6 ha y 87.9 ha respectivamente.

Para el municipio de Aporo su cobertura cerrada durante 1971-2015 disminuye de 220.5 ha a 193.8; sin embargo, su cobertura semiabierta aumenta a partir del 1994 hasta alcanzar ya en 2015 un total de 397.7 ha. Por otro lado la cobertura de arbolado cerrada sufrió pocas pérdidas durante estos años con 220.59 ha en 1971 paso a 193.8 ha en 2015 (Tabla 5).

Tabla 5. Análisis cambio de densidad de cobertura forestal y uso de suelo 1971-2015, representado para cada municipio incluido dentro de la cuenca Rio La Plancha, en hectáreas y porcentaje en relación de la superficie total

	Cerrada		Semicerrada		Semiabierta		Abierta		Deforestado		Agricultura	
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
1971												
Anganguero	405.89	9.59	475.70	11.24	106.55	2.52	26.13	0.62	17.36	0.40	791.82	18.71
Aporo	220.59	5.21	74.95	1.77	18.95	0.45	14.70	0.35	8.11	0.19	339.42	8.02
Ocampo	0.00	0.00	130.45	3.08	8.52	0.20	5.26	0.12	10.77	0.25	245.51	5.80
Senguio	763.47	18.04	306.43	7.24	118.13	2.79	19.43	0.46	6.98	0.16	106.23	2.51
Total	1389.96	32.85	987.52	23.34	252.15	5.96	65.53	1.55	43.21	1.00	1482.98	35.04
1984												
Anganguero	407.10	9.62	495.62	11.71	100.03	2.36	25.82	0.61	19.87	0.46	775.01	18.31
Aporo	247.29	5.84	45.88	1.08	29.61	0.70	14.43	0.34	36.61	0.85	302.90	7.16
Ocampo	0.00	0.00	48.45	1.14	25.67	0.61	6.06	0.14	78.93	1.83	241.41	5.70
Senguio	755.32	17.85	234.96	5.55	156.37	3.70	45.76	1.08	50.28	1.16	73.62	1.74
Total	1409.71	33.31	824.91	19.49	311.68	7.37	92.08	2.18	185.68	4.30	1392.95	32.92
1994												
Anganguero	140.68	3.32	340.05	8.04	264.29	6.25	93.33	2.21	185.53	4.29	799.58	18.89
Aporo	244.88	5.79	19.94	0.47	41.71	0.99	24.78	0.59	45.55	1.05	299.86	7.09
Ocampo	0.00	0.00	47.90	1.13	25.67	0.61	6.06	0.14	79.48	1.84	241.41	5.70
Senguio	689.44	16.29	157.40	3.72	165.37	3.91	96.32	2.28	140.00	3.24	67.79	1.60
Total	1074.99	25.40	565.29	13.36	497.04	11.75	220.50	5.21	450.56	10.43	1408.63	33.29
2004												
Anganguero	140.68	3.32	350.23	8.28	355.78	8.41	47.34	1.12	133.61	3.09	795.02	18.79
Aporo	232.51	5.49	23.19	0.55	74.88	1.77	43.80	1.03	9.69	0.22	292.65	6.92
Ocampo	0.00	0.00	48.45	1.14	88.56	2.09	18.99	0.45	3.11	0.07	241.41	5.70
Senguio	691.49	16.34	185.00	4.37	260.08	6.15	57.98	1.37	65.06	1.51	56.70	1.34
Total	1064.68	25.16	606.88	14.34	779.30	18.42	168.12	3.97	211.47	4.89	1385.78	32.75
2015												
Anganguero	141.21	3.34	357.25	8.44	397.71	9.40	44.00	1.04	87.95	2.04	791.14	18.70
Aporo	193.80	4.58	18.06	0.43	114.87	2.71	55.26	1.31	2.49	0.22	292.24	6.91
Ocampo	0.00	0.00	41.16	0.97	88.56	2.09	26.27	0.62	3.11	0.07	241.41	5.70
Senguio	667.13	15.77	182.65	4.32	266.44	6.30	77.08	1.82	57.89	1.51	51.20	1.21
Total	1002.15	23.68	599.12	14.16	867.58	20.50	202.62	4.79	151.44	4.89	1375.99	32.52

Con lo que respecta al municipio de Ocampo que se encuentra dentro de la cuenca es relativamente pequeño como se mencionó anteriormente apenas alcanza 400 ha, los cambios más relevantes que se presentaron aquí

fueron aumento de la cobertura semiabierta y abierta, y una pequeña disminución de superficie agrícola paso de 245.5 ha en 1971 a 241.4 ha.

El municipio de Senguio dentro de la cuenca presenta un bosque denso que abarcaba en 1971 un total de 763.47 ha y en 2015 disminuye a 667.13 ha lo que lo convierte en el municipio con mayor cobertura cerrada dentro de la cuenca un hecho importante al albergar el santuario de mariposa monarca Chincua. Sin embargo, su cobertura de densidad vegetal semiabierta aumenta considerablemente partir del 2004, cubriendo ya para el 2015 266.4 ha lo cual implica un degradación forestal importante. Otro acontecimiento relevante es la disminución de superficies deforestadas que va de 140 ha en 1994 a solo 57.8 ha en 2015, de igual forma la agricultura disminuye de 106.2 ha en 1971 a solo 51.2 ha que comprenden a dicho municipio.

Cabe señalar de manera más particular que en estos municipios la tenencia de la tierra es un factor de vital importancia al analizar los cambios de usos de suelo y degradación, ya que son los habitantes los que usan y viven en los bosques de la región, de esta forma dentro de la microcuenca del río La Plancha son los ejidatarios los principales dueños de estos territorios destacando en la parte norte y este; Jesús Nazareno (202.76 ha), Rincón de Soto (129.42 ha), Arroyo Seco (116.04 ha), Ampliación Hervidero y Plancha (95.28 ha), Cerro Prieto (83.16 ha), Anganguero (31.68 ha) y Los Remedios (1.33 ha). En la parte centro y sur se encuentra ocupado por los ejidos de Hervidero y Plancha (1294.5 ha),

Rondanilla (1020.68 ha) mientras que la porción Norte por otro tipo de tenencia 1230.91 ha.

Tabla 6. Ejidos dentro de la microcuenca del Río La Plancha y su densidad forestal y uso de suelo 2015.

<i>Densidad de cobertura forestal 2015</i>	Cerrada	Semicerrada	Semiabierta	Abierta	Deforestado	Agrícola	Flujo de lodo
	ha						
JESUS NAZARENO	99.83	32.35	29.44	5.88	1.96	23.75	10.79
RINCON DE SOTO	88.23	3.70	12.88	7.68	14.86	2.87	
ARROYO SECO	96.12	2.07	4.65	10.65	2.26	1.01	
AMP. HERVIDERO Y PLANCHA	27.66		39.18	1.62	20.85	6.01	0.55
CERRO PRIETO	64.47	7.42	7.86	3.55	0.38		
ANGANGUEO	14.93	0.65	2.24	0.69	0.31	13.06	
LOS REMEDIOS	1.25		0.07				
HERVIDERO Y PLANCHA	133.53	266.74	269.62	50.09	87.58	487.47	5.97
RONDANILLA	41.69	199.21	273.60	59.96	7.87	430.44	
OTRO	434.43	86.99	228.02	62.47	15.38	411.38	

La densidad de cobertura forestal y uso de suelo en 2015 refleja la influencia de los usos históricos de los habitantes, acentuando otro tipo de tenencia tienen la mayor superficie de bosque cerrado 434.43 ha, el Ejido Hervidero y Plancha con 133.53 ha con cobertura cerrada y el Ejido Jesús Nazareno con 99.83 ha; sin embargo, en la actualidad siguen presentándose áreas deforestadas como se mencionó anteriormente concentradas en los Ejidos de Hervidero y Plancha 87.5 ha y Amp. De Hervidero y Plancha 20.8 ha aunado a una de una extensa superficie con uso agrícola.

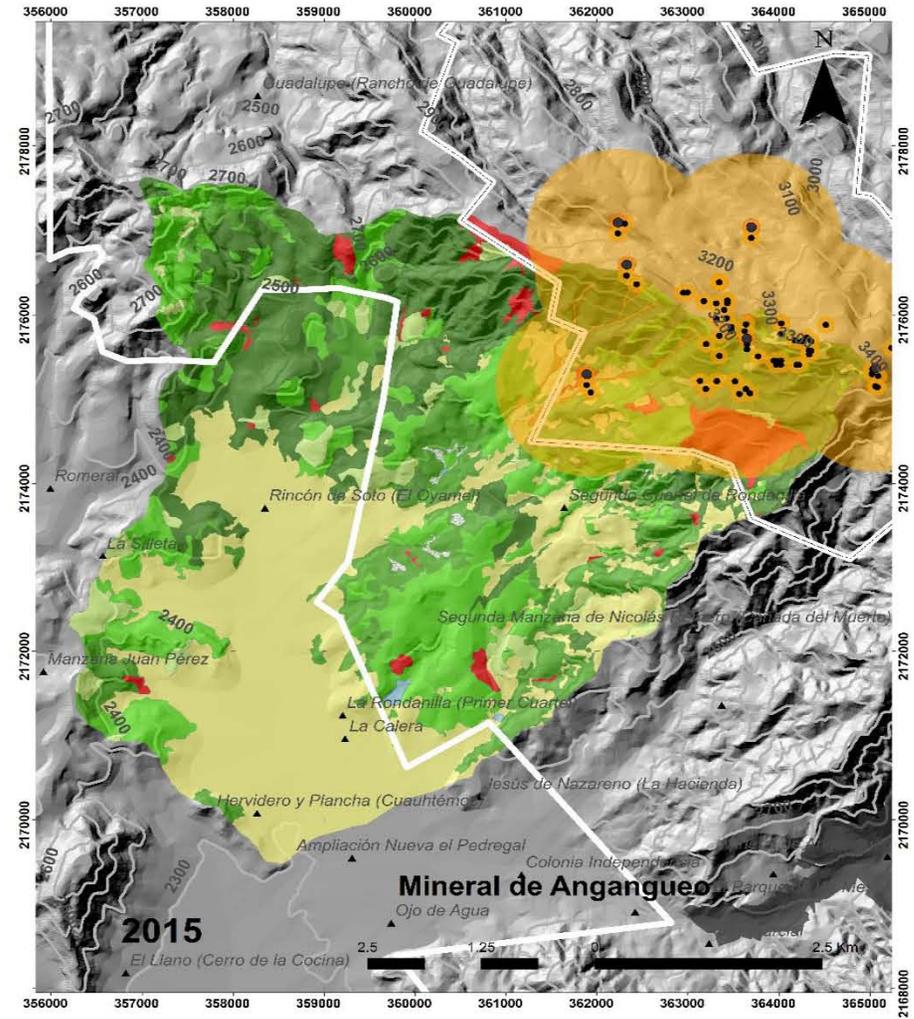
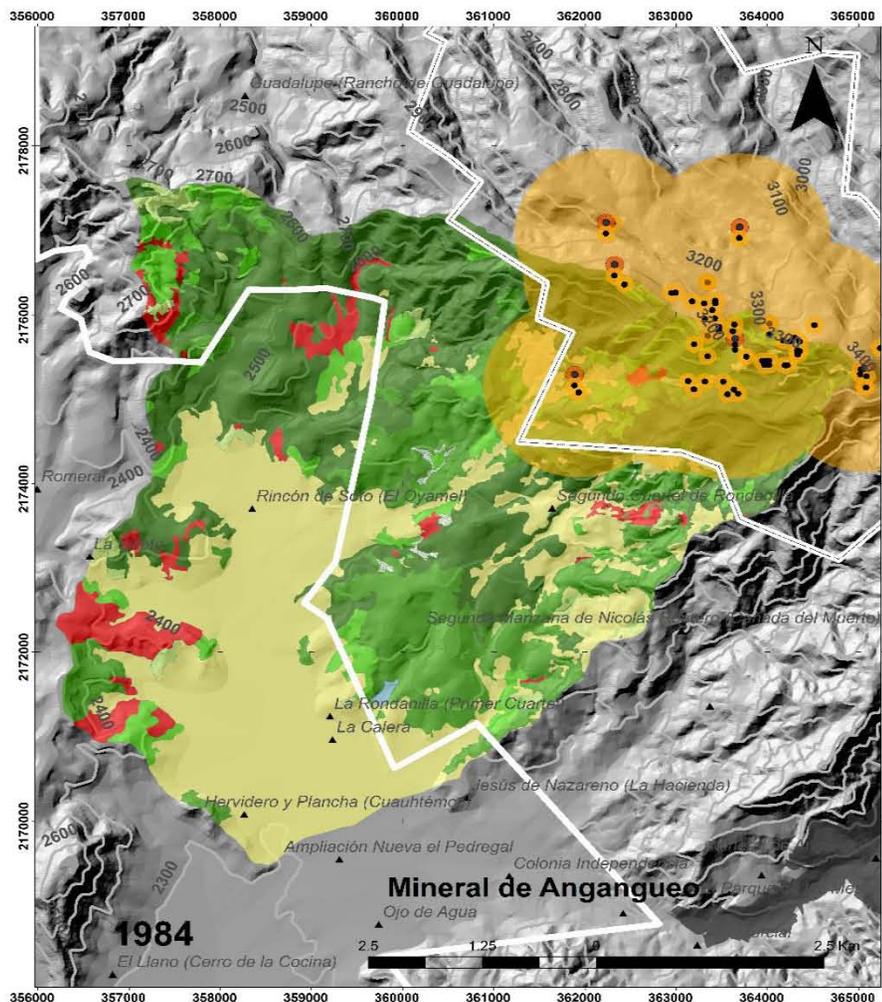
Mediante evaluación de la densidad de cobertura forestal y uso de suelo se identificaron cuáles son los municipios y ejidos que se involucran en el uso y gestión forestal, en la dinámica destaca el caso de Angangueo por cubrir una superficie importante con bosque denso; sin embargo, gran parte presenta agricultura muy cercana a los sitios de hibernación de mariposa monarca lo significa fragmentación del hábitat, un problema ecológico importante. Por otro lado el municipio de Senguio presenta una amplia superficie con bosque denso; sin embargo, también su superficie agrícola está muy cercana al santuario de Chincua, lo que debería traducirse en nuevas medidas o estrategias para no seguir ocupando con agricultura superficies tan cercanas a los santuarios, además de esto se identificaron cuáles son las problemáticas en cuanto ambientes perturbados, la dinámica de cambio se da marcadamente en los municipios en ciertos periodos como 1994 en donde se presentan la degradación del bosque y ampliación de zonas deforestadas y para el 2015 estas aéreas son zonas en recuperación disminuyendo la presión sobre el bosque.

4.1.3 Relación entre densidad de cobertura forestal y localización de colonias de mariposa monarca, microcuenca río La Plancha

La microcuenca del río La Plancha alberga año tras año el fenómeno migratorio de mariposa monarca *Danaus plexippus* en sus bosques; sin embargo, la degradación de los mismos afecta directamente la localización y dinámica poblacional, los resultados que se encontraron al intersectar la

distribución espacial de las colonias de las mariposas con la densidad de cobertura forestal para dos períodos 1986 y 2015, demostraron que las zonas registradas de hibernación para 1986 las colonias incidían con bosque con densidad cerrada en un 46.4% del total de registros, para la cobertura semicerrada también se presentó un 46.42%, mientras que para clases semiabierta y abierta fue de 3.5% para cada una.

La comparación para el año de 2015 muestra los sitios también incide en 46.4% con cobertura cerrada, mientras que en cobertura semicerrada disminuyó a 39.28%, por otro lado aumenta la superficie de las colonias con cobertura de bosque semiabierta, otro hecho relevante es que para 2015 algunos de los sitios que son potenciales para el establecimiento de las colonias ahora son áreas que fueron deforestadas y están en recuperación. Estos resultados son comparables con los reportados por Willians *et al.*, (2007) en donde se hizo un análisis sobre relación entre la densidad de cobertura forestal y los sitios de hibernación de la mariposa monarca para determinar las preferencias para colonizar de éstas, encontrando que las mariposas monarca requieren una combinación de bosque semicerrado y semiabierto para colonizar extendidos que les permita volar a las fuentes de agua.



SÍMBOLOS CONVENCIONALES

- Área Urbana
- ▲ Localidades
- Zona Amortiguamiento RBMM (2009)
- Zona Núcleo RBMM (2009)
- Curvas de nivel Equidistancia 100 m

LEYENDA TEMÁTICA

- Densidad de cobertura forestal y uso de suelo**
- Cerrada
 - Semicerrada
 - Semiabierta
 - Abierta
 - Deforestado
 - Pastizal
 - Agricultura
 - Cuerpo de Agua
 - Flujo de lodo

INFORMACIÓN GEODÉSICA

Proyección.....UTM
 Datum horizontalNAD27
 Zona.....N14
 Meridiano central.....-99°
 Meridiano base.....Greenwich

FUENTES

Sitios de invernación de mariposa monarca fueron obtenidos a través del monitoreo de SEMARNAT, PROFEPA, CONANP, WWF y fuentes de información académica Calvert y Brower L.

Elaboró Mavíael Sarai Velázquez Quintana

ZONA DE INFLUENCIA MARIPOSA MONARCA MICROCUENCA RÍO LA PLANCHA

- Colonias mariposa monarca *Danaus plexippus*
- Zona de influencia 100m
- Zona de influencia 1000m



Figura 16. Mapa de la zona de influencia de los santuarios de mariposa monarca *Danaus plexippus* (1000 m), microcuenca del río La Plancha

Así mismo, la configuración del bosque de hibernación tiene un microclima que protege a las mariposas de un clima extremo cálido y de la congelación, del viento y desecación. La temperatura fresca que es moderada por los límites del dosel de bosque a gran altitud, limita la actividad de las mariposas, conservando así sus reservas de lípidos (Brower & Malcom, 1991).

De esta manera, no sólo la estructura arbórea donde se ubican las mariposas monarca es importante para su estadía en los bosques en México, también lo es la configuración espacial en los alrededores de las colonias algunos investigadores han reportado que el área crítica para el acceso de los recursos hídricos hacia los que se desplazan es de 1000 m (Alonso-Mejía *et al.*, 1988), por lo que esta distancia se tomó en cuenta para analizar dentro de la microcuenca del río La Plancha las regiones afectadas por la degradación y deforestación en ésta área potencial de desplazamiento de las mariposas monarca. Esta superficie dentro de la microcuenca cubre 650.9 ha de las cuales se puede destacar en el período de 1984 estaba ocupado por una amplia superficie con cobertura de bosque denso 319.4 ha seguida por 155.3 ha con cobertura semicerrada y sólo 5 ha estaban deforestadas; sin embargo, la actividad agrícola cubría una superficie importante con 75.6 ha durante este año (Figura 16).

Tabla 7. Región de influencia de las colonias de mariposa monarca

Cobertura	1984	2015
	ha	ha
Cerrada	319.44	211.04
Semicerrada	155.39	112.36
Semiabierta	78.55	142.21
Abierta	16.24	28.37
Deforestado	5.72	75.07
Agricultura	75.63	65.06
Flujo de lodo	-----	16.87
Total	650.98	650.98

Para el año de 2015 los resultados reflejan que dentro del área de potencial desplazamiento de mariposa monarca ocurrió una disminución de cobertura cerrada a 211 ha y semicerrada con 112.6 ha, además de una degradación al aumentar la cobertura semiabierta que ocupa 142.2 ha, también la deforestación aumento notablemente y ocurrieron procesos de remoción en masa que también contribuyen a la pérdida del hábitat, sin embargo la actividad agrícola disminuye.

Así, se puede destacar la reconfiguración de los bosques donde hiberna la mariposa monarca particularmente la agricultura se presenta dentro de la cuenca con altitudes de hasta 2900 m lo que implica compartir espacios de distribución con los sitios de hibernación de mariposa monarca. Además de la degradación forestal lo que potencia eventos erosivos como los flujos de lodo. Estos acontecimientos de degradación y fragmentación forestal deben de tener seguimiento y realizarse monitoreos en las colonias para identificar como podrían verse afectadas o bien implementar políticas que gestionen o limiten el uso agrícola cercano a estos sitios.

Las prácticas destructivas no sólo eliminan las secciones del hábitat por la tala, sino que también degradan el bosque a través del adelgazamiento de las zonas de desplazamiento. Las reducciones en el dosel alteran el microclima forestal, aumentando la exposición y el acceso de los depredadores, y en última instancia condenan a un aumento de la mortalidad severa mariposa, especialmente durante fuertes tormentas de invierno (Calvert *et al.*, 1983; Bebi *et al.*, 2001; Browen *et al.*, 2012).

4.2 Densidad de cobertura forestal, índices de vegetación y la estructura horizontal, microcuenca río La Plancha

La evaluación de la densidad de cobertura de dosel no sólo permitió identificar las áreas de cambio dentro de la microcuenca del río La Plancha y la configuración del hábitat de la mariposa monarca, sino que la precisión de los mapas ofrece un contexto histórico del paisaje que debe considerarse para tomar decisiones o gestionar el bosque, ya que refleje la continuidad, fragmentación, estructura y de alguna manera puede inferirse la funcionalidad del ecosistema. En este apartado se plantea la integración de algunos índices que han servido para la evaluación de la cubierta forestal por algunos autores como Rikimura & Miyatake en 1997, (que se basa en la estandarización del método para el mapeo a través de la comprensión de la respuesta espectral), con el objetivo de que estos índices permitirá complementar y comparar los resultados obtenidos por fotointerpretación.

Así el estudio de la vegetación con el empleo de imágenes de satélite se basa en la comprensión de los componentes estructurales de la hoja, que reflejan las condiciones biofísicas de la planta, de esta forma la hoja dispone en la superficie del haz, o adaxial, por una epidermis cutinizada con capas muy gruesas de cutina y ceras generalmente sin estomas, mientras que en la superficie del envés, o abaxial, hay una epidermis más delgada y con gran densidad de estomas. Entre estas capas epidérmicas se localiza el mesófilo o tejido parenquimático. El que se diferencia en dos tipos: el clorofílico y el lagunar. El parénquima clorofílico, próximo a la superficie del haz, es un tejido fotosintético con células que contienen una gran cantidad de cloroplastos. En donde las células son alargadas y se sitúan perpendiculares a la epidermis y por ello se habla de parénquima empalizada. Mientras que el parénquima lagunar las células son más redondeadas y con espacios intercelulares (esponjoso) (Dkhar, 2014).

Las estructuras tienen un comportamiento diferente en la respuesta espectral, los estudios derivados de imágenes de satélite se llevan a cabo por lo general en las regiones visibles e infrarrojo cercano del espectro electromagnético (350-2500 nm), pues es en este rango donde está la estructura de la hoja, los pigmentos fotosintéticos, nutrientes y el agua tienen efecto en la cantidad de energía reflejada (Orych *et al.*, 2013).

La respuesta espectral de la vegetación sana se caracteriza por la disminución en el espectro visible en las regiones azul y rojo. Estas regiones son la zona de absorción de la clorofila. La clorofila de la planta se puede distinguir en dos tipos de pigmentos: clorofila (verde-azul) y la clorofila b (verde-amarillo), que combinados crean una impresión óptica del color verde. La clorofila *a* absorbe en los 430 y 660 nm y longitudes de onda mientras que la clorofila *b* en los 450 y 650 nm otros pigmentos como los carotenos y xantofilas absorbe en las longitudes del verde 550 nm. En situaciones de estrés la clorofila dentro de las hojas disminuye causando menor energía absorbida, incrementándose la reflectancia en el este mismo rango Figura 17 (Jarocińska & Zagajewski 2008).

En la región del infrarrojo cercano (750-1350 nm), la cantidad de energía reflejada en plantas sanas puede ser hasta 50% (Jarocińska & Zagajewski 2008). Existiendo muchas características estructurales de la hoja que pueden contribuir a esta reflectancia, dentro de la hoja la luz es dispersada en las interfaces de las paredes celulares y el aire intercelular, debido a un cambio en el índice de refracción (Gausman *et al.*, 1969). La reflectancia en el infrarrojo ha mostrado una relación directa con la razón entre superficie del mesofilo (A_{mes}) expuesto a los espacios de aire intercelulares expresada en unidad de área foliar A_{mes}/A , de igual forma se encontró una correlación positiva con la bicoloración de la hoja y el grosor de la cutícula (Stalone *et al.*, 2001).

Vogelmann *et al.*, (1993) mostraron que las células alargadas del mesófilo clorofílico propagan las longitudes de onda más profundamente en el interior de la hoja mientras que el mesófilo esponjoso con células más esféricas tiende a dispersar la radiación. Además de éstos, en algunas coníferas las ceras epicuticulares pueden mejorar la reflectancia en el infrarrojo cercano de 5-20% (Mulroy, 1979).

Otra variación en la reflectancia de la hoja en el infrarrojo cercano se presenta cuando la planta presenta estrés hídrico el mesófilo esponjoso colapsa en cuestión de horas y su eficiencia de reflejar la luz se reduce en gran medida (Jarocińska & Zagajewski 2008).

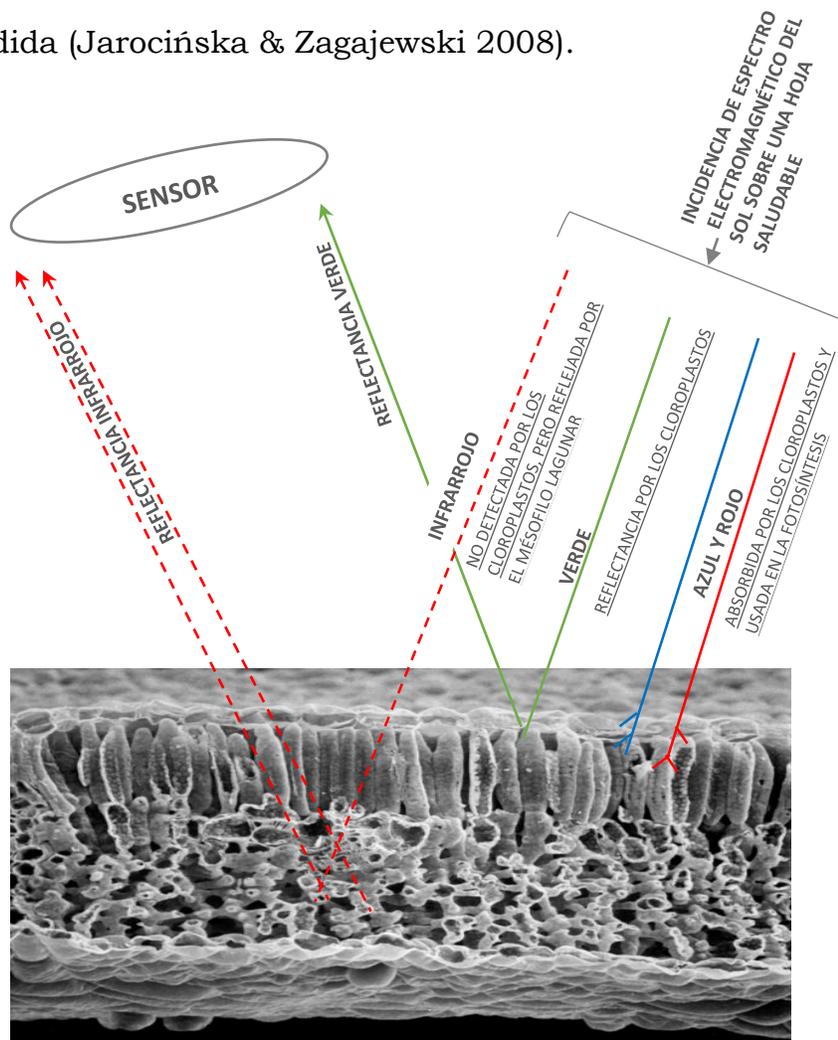


Figura 17. Respuesta en la región visible e infrarrojo cercano del espectro una hoja saludable (Basado en Estes, J & Hemphell, J, 2001).

Los índices que proponen Rikimura y Miyatake (1997) se basan en estos principios biofísicos y su relación con la respuesta de reflectancia y radiancia bajo las diferentes condiciones de Forest Canopy Density (FCD). La respuesta de los índices de vegetación en bosque y pradera se ha observado y se resume en la Tabla 8. En donde el índice de vegetación avanzado AVI reacciona con mayor sensibilidad a diferencia del NDVI. Por otro lado, el índice de sombra SI aumenta a medida que aumenta la densidad forestal. En cuanto al índice de suelo desnudo BI disminuye en cuanto mayor es la densidad de arbolado.

Tabla 8. Respuesta del bosque, pradera y suelo desnudo bajo diferentes condiciones entre índices de vegetación

	Alto-FCD	Medio-FCD	Bajo-FCD	Pradera	Suelo desnudo
AVI	Alto	Alto	Medio	Alto	Bajo
BI	Bajo	Bajo	Bajo	Medio	Alto
SI	Alto	Alto	Medio	Bajo	Bajo

Índice de vegetación avanzada AVI (Advanced vegetation index)

Dado que el NDVI es incapaz de poder identificar las diferencias sutiles entre la densidad del dosel. Se ha encontrado para mejorar mediante el uso de grado de potencia de la respuesta de infrarrojos el AVI. El índice calculado se ha denominado como índice de vegetación avanzada (AVI). Ha sido más sensible a la densidad de los bosques y las clases fisionómicas de vegetación fisionómicas.

$$AVI = ((B4+1) (256-B3) (B4-B3))^{1/3}$$

Índice de suelo desnudo BI (Bared soil index)

Las áreas de suelo desnudo, barbechos, se ha mejorado el uso de este índice usando la vegetación con una marcada respuesta de fondo. Similar al concepto de AVI, el índice de suelo desnudo (BI) es un índice normalizado de las sumas separan dos la vegetación con diferentes fondos. Completamente desnudo, cobertura forestal escasa y follaje denso.

$$BI = \frac{(B4+B2)-B3}{(B4+B2)+B3}$$

Índice de sombra de copa SI (Shadow index)

La disposición de la copa en la masa forestal conduce al patrón de sombreado que afecta a las respuestas espectrales. Los arboles jóvenes tienen índice de sombra bajo (50% menos), en comparación con los bosques naturales maduros. Las masas forestales muestran firmas espectrales uniformes comparadas con regiones abiertas.

$$SI = ((256-B1)*(256-B2)*(256-B3))^{1/3}$$

Índice térmico TI (Thermal index)

Existen dos factores que determinan la temperatura relativamente fría dentro de un bosque, una es el efecto de cubrimiento de la cubierta forestal, que bloquea y absorbe la energía del sol y otro es la evapotranspiración de la superficie de las hojas. La formulación del índice térmico se basa en banda de infrarrojo térmico.

Índice de vegetación normalizado (NDVI)

Este índice es una medida de la vegetación sana, verde. La combinación de su formulación normalizada y el uso de las regiones de absorción y reflectancia más altas de clorofila en infrarrojo cercano y rojo permiten detectar un amplio rango de condiciones. Sin embargo, puede saturarse en condiciones de vegetación densa. El valor de este índice varía de -1 a 1. El intervalo común para la vegetación verde es de 0.2 a 0.8 (Rouse *et al.*, 1973).

$$NDVI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)}$$

Para realizar una comparación óptima y eliminar la distorsión debido a la variación del azimut, las condiciones atmosféricas del sol y la respuesta del sensor se llevaron para el caso de la imagen Landsat 8 particularmente las bandas infrarrojo térmicas 10 y 11 una conversión de los niveles digitales ND a valores de radiancia.

Para el sensor OLI y TRIS se puede obtener la radiancia usando factores rescalados proporcionados en su metadato.

$$L_{\lambda} = M_L Q_{cal} + A_L$$

Donde L_{λ} es la radiancia espectral (Watts/ m² srad μ m), M_L es el factor de escala multiplicativo específico para cada banda (RADIANCE_MULT_BAND_X donde X es el número de banda), Q_{cal} es el factor aditivo específico en cada banda (RADIANCE_ADD_BAND_X donde X

es la banda) y A_L son los valores de los pixeles productos de la calibración ND.

En el caso de la imagen SPOT no fue necesario ya que se contaba con corrección y los datos estaba en unidades de radiancia (Watts/ m^2 srad μm), por lo que se realizó sólo la conversión a reflectancia.

$$P_{\lambda} = \frac{\pi L_{\lambda} d^2}{ESUN_{\lambda} \cos \theta_s}$$

Donde P_{λ} es la reflectancia planetaria, π es la constante matemática igual 3, 14159, L_{λ} es la radiancia de cada sensor (Watts/ m^2 srad μm), d es la distancia de la Tierra al Sol (unidad astronómica), $ESUN_{\lambda}$ es la media de la radiancia exoatmosférica ($W/(mm^2)$) y θ es el ángulo del cenit solar (grados/ radianes).

4.2.1 Comparación de los índices de vegetación y la densidad de cobertura forestal

Para llevar a cabo la comparación del mapa de densidad de cobertura y los índices, se extrajo el valor de 100 puntos dentro de la microcuenca del río La Plancha distribuidos al azar a partir de la imagen SPOT 6 del año 2015, para analizar la relación entre la densidad de cobertura forestal y los diferentes índices extraídos de las imágenes.

Al comparar los valores de los índices obtenidos de la imagen de satélite SPOT 6 y la densidad de cobertura forestal con la interpretación visual se encontraron ciertos patrones.

En la cobertura cerrada los índices de vegetación AVI y NDVI fueron los segundos más altos en el análisis en promedio 7.48 y 0.26 respectivamente, en cuanto al índice de suelo desnudo SI y TI fueron los valores más bajos comparados con las otras categorías de densidad de copas Tabla 9, este patrón refleja la estructura en los bosques cerrados la cual se asocia a una mayor actividad fotosintética y biomasa foliar. La información térmica del bosque está influenciada por la sombra en donde en arbolado joven o poco denso, los valores espectrales son más altos al compararse con bosque maduro o denso.

En la cobertura semicerrada los valores fueron menores en los índices de vegetación comparado con la cobertura cerrada para el caso de AVI fue en promedio 7.30 y con el NDVI de 0.22, estos valores no difirieron mucho al comparar estas categorías; sin embargo, los índices BI y TI aumentaron lo que indica mayor exposición de suelo (Tabla 9).

La cobertura semiabierta los valores de AVI y NDVI resultaron los más altos comparados con las demás categorías lo que se explica porque la mayoría de estos sitios son regiones con bosque sucesional; sin embargo, no es sencillo distinguir entre un bosque primario y uno secundario, pues muestran firmas espectrales similares (Lucas *et al.*, 1993); sin embargo, el previo análisis secuencial temporal con fotografías aéreas permitió identificar estos sitios, los cuales se caracterizan por ser colonizados por especies heliófilas, con tasas fotosintéticas altas implicando mayor

superficie fotosintética (Bazzaz, 1991); además de esto, en estadios temprano la tasa fotosintética aumenta en comparación de bosques maduros. En cuanto a los índices BI y SI también disminuyen al compararlos con bosque más denso, lo que indica que a pesar de encontrar valores altos en los índices de vegetación la superficie de claros que exponen el suelo aumenta para esta clase.

En la categoría abierta se encontró una diferencia importante en el índices de vegetación AVI ya que disminuye de una manera importante de 7.70 en la cobertura semiabierta a 7.15; sin embargo, con el NDVI los valores son muy bajos 0.18 lo que está relacionado ya que la respuesta espectral corresponde a un pixel en la banda infrarroja y en la banda roja determinados fundamentalmente por el suelo, con una pequeña variación debida a la presencia de vegetación. Así, en una zona con baja densidad de vegetación los resultados son muy similares a los del suelo desnudo y la detección de la presencia de vegetación es casi nula. De hecho, este problema es bastante grave cuando la cubierta vegetal es menor del 50%, lo que ocurre bastante a menudo incluso en zonas cultivadas (Sánchez *et al.*, 2000).

Para las áreas deforestadas, los índices de BI y TI son más altos que en coberturas con arbolado 236.92 y 273.14, de esta forma el empleo de estos índices a la par puede usarse como una herramienta eficaz al identificar

regiones deforestadas y focalizar los esfuerzos y estrategias para recuperar estos sitios.

En la región agrícola aunque no representa una categoría de densidad forestal se evaluaron los índices para compararse con las regiones boscosas, valores de AVI fueron los menores al igual que el NDVI, lo que implica la baja actividad fotosintética, los valores de TI fueron los más altos al igual que el BI.

Tabla 9. Comparación de la densidad de cobertura forestal y los valores promedio y una desviación estándar de los índices AVI, NDVI, BI, SI y TI derivadas de imagen SPOT 6 del año 2015

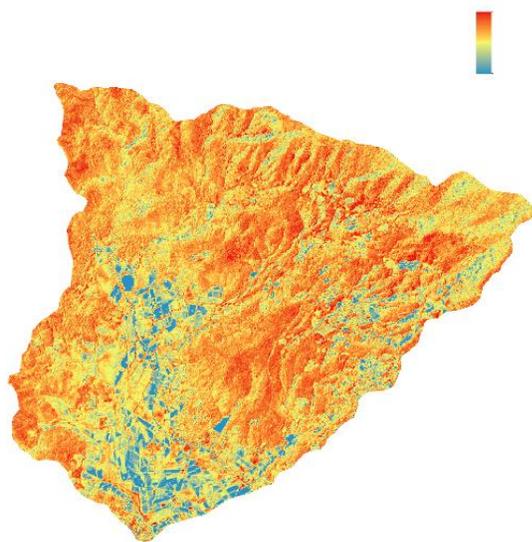
Densidad de cobertura	AVI	NDVI	BI	SI	TI
Cerrada	7.48 ±1.3	0.26±0.1	89.28±17.4	237.73±0.5	269.36±6.4
Semicerrada	7.30±0.8	0.22±0.08	85.94±14.0	237.68±0.6	272.55±6.4
Semiabierta	7.70±0.8	0.27±0.07	90.67±13.5	237.57±0.9	270.46±5.4
Abierta	7.15±0.7	0.18±0.1	94.50±19.7	237.28±0.9	273.14±8.9
Deforestado	6.50±0.8	0.08±0.1	105.93±36.3	236.92±1.3	273.13±11.2
Agrícola	5.01±2.2	-0.24±0.1	188.47±38.8	232.84±1.9	285.94±7.5

La comparación de estos resultados es complicada ya que en la región de la RBMM no se tienen muchos estudios sobre la aplicación de estos índices en la degradación foresta; de igual caso, para México generalmente los estudios se centran en el empleo del NDVI como un indicador de deforestación y no de densidad de forestal.

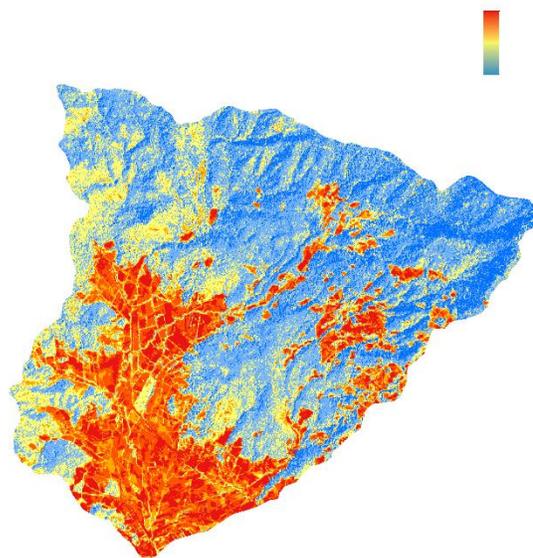
Un intento de emplear algunos índices espectrales fue el trabajo de Velasco y colaboradores (2010), para calcular el índice de área foliar en la RBMM; sus resultados también apuntan que la región del Santuario Sierra Chincua, la cual queda incluido en el área de estudio de este trabajo, tienen una alta densidad con valores de 2 a 4.5 en el índice de área foliar.

De esta manera, al igual que la densidad de cobertura forestal, los diferentes índices se distribuyen espacialmente (Figura 16), encontrando ciertos patrones, y destacando a los bosque en la región más alta (ladera de montaña) de la cuenca los valores más altos de NDVI y AVI, además de tener TI más bajos asociados a la temperatura relativamente más fría dentro de un bosque, debido se presenta un mayor cubrimiento de la cubierta forestal, la cual bloquea y absorbe la energía del sol, además de presentar una evapotranspiración en la superficie de las hojas, lo cual mantiene bajas temperaturas en dichas condiciones (Rikimura, 2002). En las partes medias de la cuenca no se observan patrones pues se ubican combinaciones de niveles altos y bajos de NDVI y AVI asociado al bosque con menor densidad forestal.

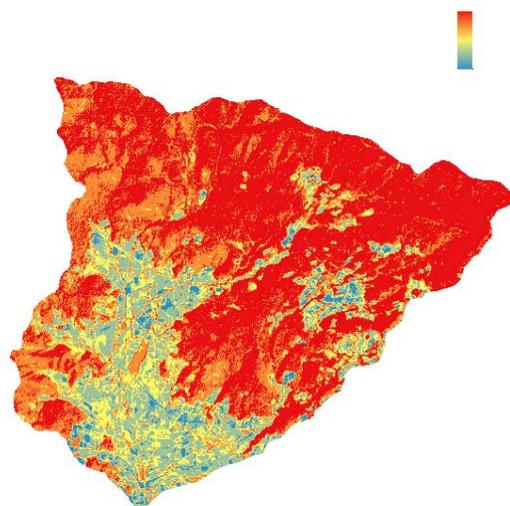
En cuanto a las regiones más bajas dentro de la cuenca que se relacionan generalmente a regiones agrícolas se presentaron valores bajos en NDVI y AVI pero valores altos en el BI y TI (Figura 18).



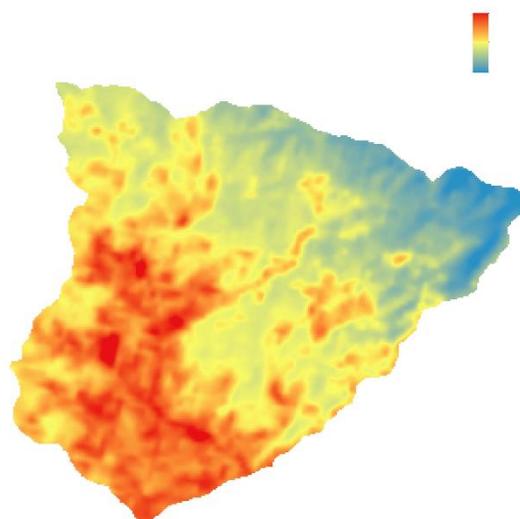
Índice avanzado de vegetación AVI



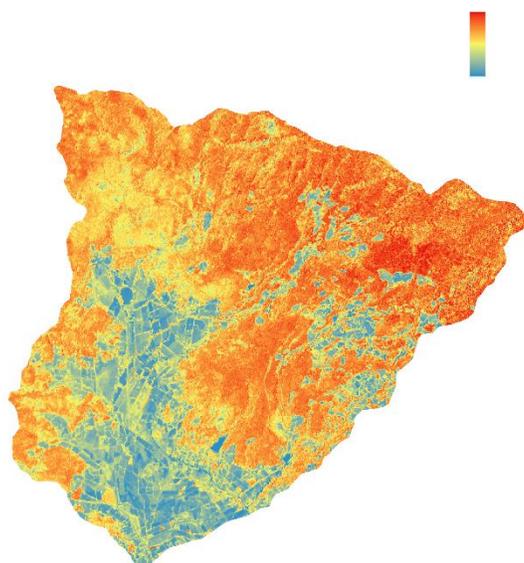
Índice de suelo desnudo BI



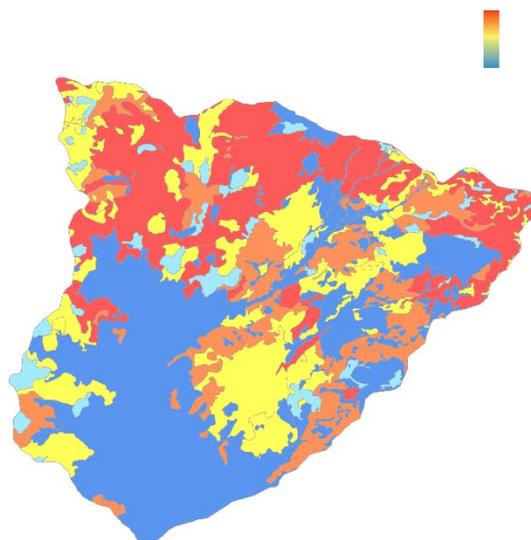
Índice de sombra SI



Índice térmico TI



*Índice Normalizado de Vegetación
NDVI*



*Densidad de cobertura forestal por
interpretación visual.*

Al analizar los coeficientes de correlación entre los se encontró un valor alto de correlación positivo entre el AVI y el NDVI 0.78 y con el SI que fue de -0.5139, lo que indica que entre mayor sea los índices de vegetación el índice de suelo desnudo disminuye; sin embargo, los valores del NDVI mostraron una correlación mayor con los otros índices. Los valores más altos tanto de AVI como NDVI se localizaron en la parte norte y centro.

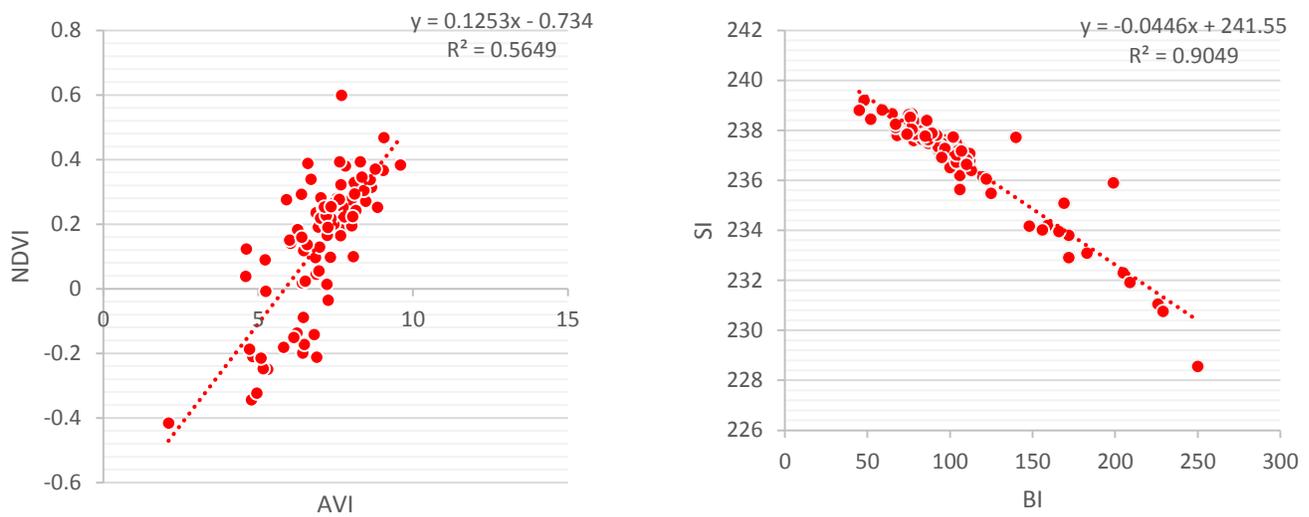


Figura 19. Ajuste de la curva entre el NDVI -AVI y SI-BI.

Para el caso del índice SI, se presentó también una relación alta con el índice de vegetación, revelando que donde hay mayor cantidad de árboles también habrá mayor sombra, lo que indica la estructura del bosque ya que donde se localizan los valores más altos se trata de bosque más denso o bien con mayor altura. Estas regiones se encuentran en la parte norte del área de estudio, y en la parte central; sin embargo, algunas regiones con valores medio-bajos del SI y de BI mostraron valores altos de AVI y NDVI lo que puede reflejar que se trata de bosques jóvenes o sucesionales

que no se encuentran con densidad de cobertura densa. Las regiones con menor SI se localizaron cerca de regiones agrícolas.

El otro índice que se analizó fue el BI que resultó en un indicador importante para separar regiones con cubierta y sin cubierta forestal, mostrando un coeficiente de correlación alto -0.83 con el NDVI y 0.64 con el TI, este índice puede emplearse para la valoración de regiones deforestadas junto con el índice TI, ya que define a detalle y de manera semiautomática aquellas regiones que no tienen importante número de árboles, lo que resulta en una herramienta que puede agilizar la detección de áreas no solo deforestadas sino también degradadas.

Con lo que respecta al TI no se encontró un coeficiente de correlación tan alto como con los demás casos con -0.70 con el NDVI y 0.64 con respecto al BI, lo que indica en los bosque es menor la temperatura que está determinada por dos factores, una es el efecto de cubrimiento de la cubierta forestal, que bloquea y absorbe la energía del sol y otro es la evapotranspiración de la superficie de las hojas.

Estos índices reflejaron una respuesta específica en las diferentes categorías de densidad de cobertura forestal, por lo que podrían emplearse para estudios futuros como base o bien para verificación de ciertas áreas que resulten alguna incertidumbre por fotointerpretación, generando así estudios más detallados de la configuración y cambio en los bosques del país.

4.2.2 Estructura horizontal y vertical del bosque y su relación con los índices de vegetación

La estructura horizontal y vertical en los bosques templados está relacionada con su estructura poblacional en donde, a diferencia de los bosques tropicales, se presentan pocas especies representadas por un número elevado de individuos, generando estructuras homogéneas con patrones similares con tres estratos; arbóreo, arbustivo y herbáceo (Kageyama, 1994).

La estructura del bosque ayuda al entendimiento del ciclo del crecimiento del bosque, donde se diferencian las fase de claro, fase de reconstrucción y fase madura o estado de equilibrio (Bourgeron, 1983). Además da información funcional del bosque la cual establece que la estructura tridimensional del bosque determina la cantidad de espacios ocupados por troncos, ramas, árboles, a diferentes niveles y en consecuencia, el microclima interno y la energía disponible para los organismo (Richards, 1983).

Con la finalidad de caracterizar el estado de conservación del bosque que se encuentra dentro de la área de estudio de este trabajo, se llevó a cabo un recorrido en campo y el levantamiento de muestreos de 1000 m², recabando datos dasonómicos como el diámetro a la altura del pecho (DA), altura y género (Figura 20). Además de servir para la caracterización de los sitios de muestreo se compararon estas medidas con los índices obtenidos

con base a la respuesta espectral en cada tipo de vegetación y uso de suelo. Los muestreos se enumeraron por letras dependiendo de la unidad geomorfológica. La vegetación que se encontró fue Bosque de Pino (A2, B3, C1 y G1), Bosque de Pino-Encino (A1 y D3), Bosque Encino-Pino (B1), Bosque Roble (B2, G2) y Bosque de Oyamel (D1, D2).

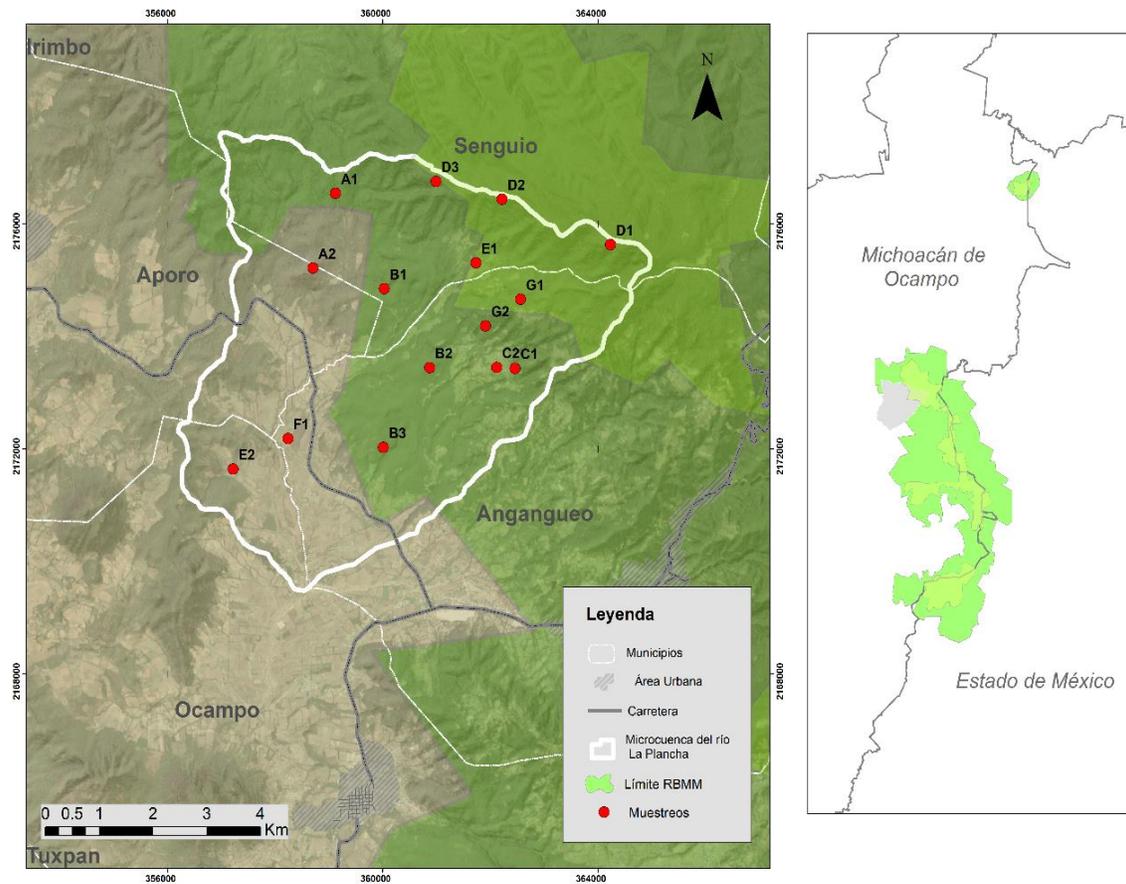


Figura 20. Distribución de los sitios de muestreo

La densidad del arbolado en los diferentes sitios fue heterogénea, encontrando el menor número de arbolado igual a 300 (B3) individuos por hectárea y el valor máximo 2440 (A2); esto nos habla que la distribución dentro del bosque que presenta áreas más abiertas que otras. En cuanto a su relación con los índices de vegetación, el NDVI fue superior a 0.3 cuando los árboles por hectárea era mayor de 780 árboles/ha a excepción del muestreo C1 y A2, para el caso del AVI de igual forma aumentó a partir de 780 árboles/ha tomado valores mayores o cercanos a 8. En cuanto a BI los valores más bajos se encontraron en sitios con 1150 y 830 árboles por hectárea, mientras que los más altos en zonas agrícolas. El índice SI mostró poca diferenciación entre regiones con mayor o menor número de árboles, pero si se distingue en valores menores en agricultura. El ultimo índice TI su valores varían con el valor más bajo igual a 250 en bosque cerrado con 850 árboles/ha mientras que el valor más alto 294 en la agricultura.

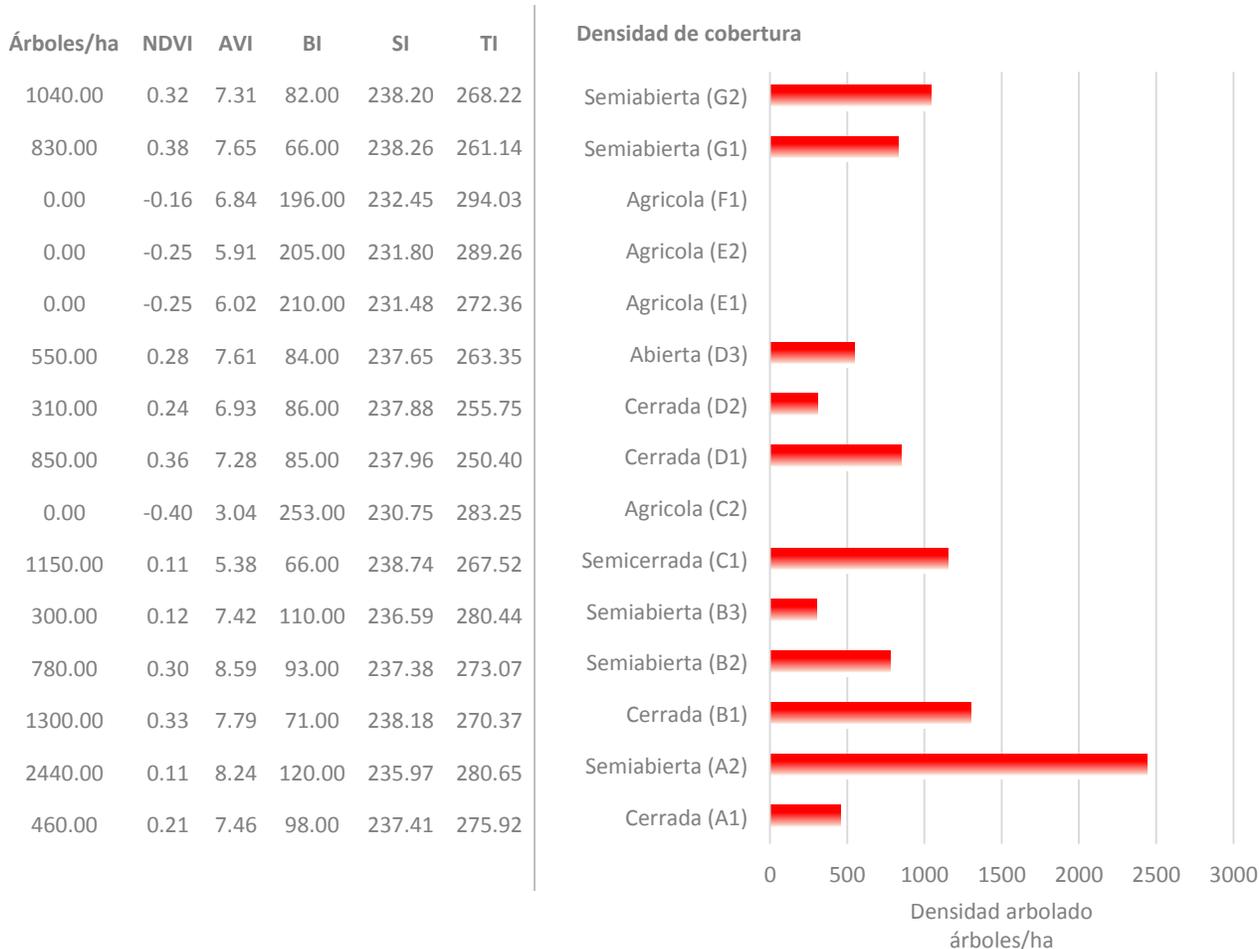


Figura 21. Comparación de la densidad de arbolado y los índices de vegetación

Otra de las variables que se analizaron fue la altura de los individuos, la cual está relacionada con la edad del bosque o bien con la disponibilidad de nutrientes para su desarrollo. El muestreo que tiene la altura mayor fue D2 con 16.2 m en promedio mientras que el de menor altura se localiza en A1 con 6.5 m. El índice que se esperaría con mayor relación conforme a esta variable sería el índice de sombra SI, encontrando valores altos 238.1 y 237.1 en muestreos con alturas promedio de 11.1m y 16.24m respectivamente.

Sin embargo, también se presentaron valores altos en el muestreo G1 y G2 lo que puede estar relacionado con el número de árboles por hectárea en donde se estarían sumando las sombras de todos los árboles.

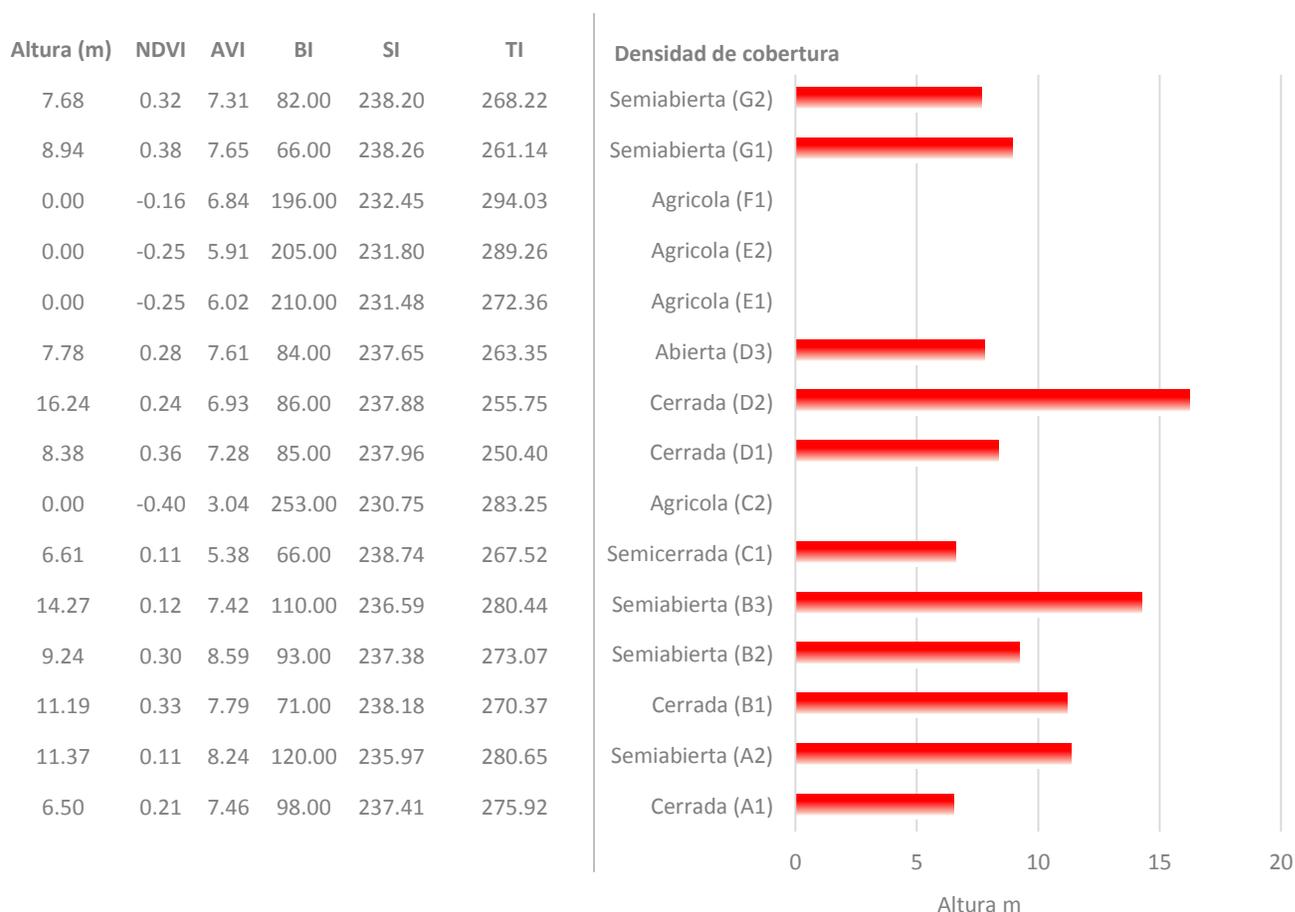


Figura 22.. Comparación de la altura del arbolado y los índices de vegetación

En cuanto a la estructura horizontal del bosque, se presentó una variación de 26.4 a 117.8 cm DA, los diámetros mayores se asocian a la cobertura cerrada. Su relación con el NDVI y AVI muestra los valores más altos en zonas con arbolado más alto además de DA más ancho; este hecho sugiere mayor actividad fotosintética en estas zonas.

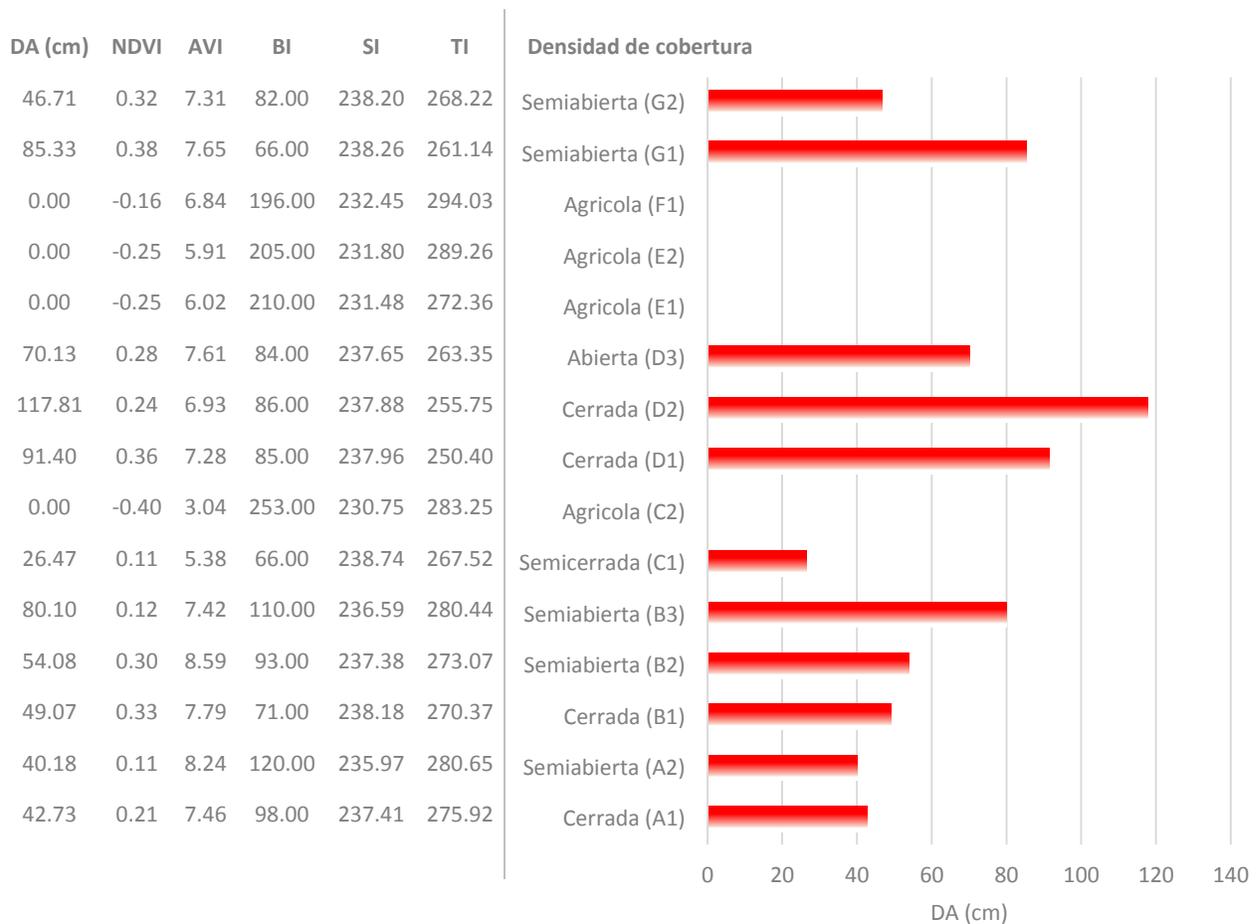


Figura 23. Comparación del DA del arbolado y los índices de vegetación

Como se muestra en las métricas dasométricas la heterogeneidad de las condiciones del bosque resulta en una difícil generalización y obtención de patrones. Sin embargo, se pueden observar ciertas características relevantes como el hecho de que no sólo influye en su respuesta espectral el número de árboles que se encuentran en los sitios evaluados, sino que se trata de una combinación de estas variables pues en sitios donde se esperarían valores altos de NDVI y AVI por presentarse más árboles por hectárea (A2 y C1) no sucede así; esto se explica porque se trata de árboles con DA más pequeños, lo que se traduce en menor superficie

ocupada por individuo y mayor exposición del suelo, lo que se demuestra en valores más altos de BI.

También se presentó el caso contrario en donde menor número de árboles por hectárea (A1, D2) obtuvieron valores altos de AVI lo que en primera instancia podría entenderse como contradictorio; sin embargo, en estos sitios se presentan mayor DA lo que intervine directamente con la superficie que ocupa cada árbol y la suma de todos arroja estos valores altos por lo que los valores de BI son bajos.

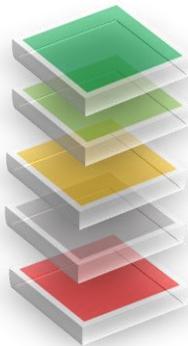
Otro escenario que se presentó fue el de los muestreos G1 y G2, en donde la cartografía por fotointerpretación lo asigna con categorías semiabierta; sin embargo, el número de árboles por hectárea es alto, además de que el DA no es pequeño para G2 y los valores de BI no son tan bajos, en este caso se trata de una región en recuperación con individuos jóvenes de menos de 9 m de altura y con follaje poco desarrollado lo que podría estar influyendo en su actividad fotosintética.

De esta manera, los índices NDVI, AVI, BI, SI y TI son complementarios a los datos obtenidos por fotointerpretación y datos dasométricos; así, su uso en estudio de índole forestal ayudaría a la interpretación y análisis de la densidad de la cobertura forestal como un importante indicador de conservación, por lo que se propone una modificación al método tradicional de obtención de densidad forestal por fotointerpretación (Figura 24) con la incorporación de los índices de FDC.

PREPROCESAMIENTO

IMÁGENES MULTIESPECTRAL

Corrección atmosférica
Extracción por cuerpo oscuro
ND a Radiancia
Radiancia a Reflectancia



Obtención de índices

$$NDVI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)}$$

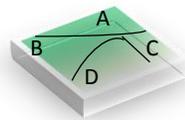
$$AVI = ((B4 + 1) (256 - B3) (B4 - B3))^{1/3}$$

$$BI = \frac{(B4 + B2) - B3}{(B4 + B2) + B3}$$

$$SI = ((256 - B1) * (256 - B2) * (256 - B3))^{1/3}$$

TI

Identificación a priori de degradadas,
deforestadas y las diferentes
densidades de cobertura.



Concordancia entre los índices de
vegetación y la fotointerpretación



PREPROCESAMIENTO

FOTOGRAFÍAS AÉREAS

Homogenizar histogramas
Georreferenciación de
fotografías digitales
Elaboración de mosaico



Incorporar la regionalización
previa generada a partir de
los índices

Interpretación de las
fotografías aéreas

Cobertura cerrada
corresponde a un área
forestal que cubra más del
76%, semicerrada 50-75%,
semiabierta 26-50%,
abierta 11-25% (López,
2011) y para la categoría
deforestado se considera
aquellas aéreas con
densidad de arbolado
menor al 10% (FAO, 2010)



Mapa densidad de cobertura
vegetal y uso de suelo



Verificación en campo a
través de de recorridos,
muestreos, entrevistas etc.

Referencia de estudios
relacionados a la cobertura
vegetal en la región



Mapa final de la densidad de cobertura forestal
y uso de suelo

Figura 24. Diagrama para la evaluación de la densidad de cobertura forestal

La incorporación de estos índices se traducirá en el perfeccionamiento y mayor rapidez al localizar regiones de cambio (recomendándose emplear imágenes de fechas iguales) pues podrán ser corroboradas con interpretación visual de imágenes con mayor resolución espacial ya sea fotografías aéreas, imágenes Quickbird, Worldview, Rapideye, Ikonos etc, según sea la disponibilidad, aumentando la precisión del estudio. Además se plantea la disminución de la subjetividad en los estudios con interpretaciones visuales (Korhonen *et al.*, 2006) al incorporar información sobre las condiciones biofísicas del bosque.

Así, un mejor monitoreo de los recursos forestales permitirá conocer la localización de estas transformaciones, para poder generar acciones de carácter inaplazable, ya que la pérdida de la cobertura arbórea involucra impactos a diferentes escalas; a nivel local generalmente disminuye la oferta de bienes y servicios, asimismo de pérdida de diversidad biológica (Sala *et al.*, 2000). Además de esto, la degradación de los bosques junto con la deforestación produce alteraciones en el suelo que conduce generalmente a la liberación de carbono a la atmósfera (CO₂), un hecho alarmante pues se considera una emisión global de 1.5 Pg C año⁻¹. (Houghton, 1998).

Capítulo V

CARBONO ORGÁNICO EN SUELOS VOLCÁNICOS



5.1 Los suelos como sumidero de carbono

El suelo es el más grande reservorio de carbono en ecosistemas terrestres en donde el C estimado en 2 344 Gt mientras que en la reserva biótica terrestre sólo alcanza 560 Gt (Jobbágy & Jackson, 2000). Sin embargo estos reservorios se distribuyen en el mundo bajo los diferentes tipos de suelo en donde los Histosoles almacenan 205 Kg m², seguidos de los Andosoles con 31 Kg m², Inceptisoles 16 Kg m², Spodosoles 14 Kg m² y los Molisoles con 13 Kg m² (Eswaran *et al.*, 1993). A escala global, la variabilidad espacial el carbono en el suelo también muestra variaciones, en latitudes más altas es mayor, disminuye en latitudes medias y aumenta en los trópicos (Minasny *et al.*, 2013).

Con la finalidad de entender esta distribución se usó el modelo de paisaje, en donde el componente geomorfológico controla una amplia parte de la variabilidad espacial y de esta forma poder caracterizar al COS en su contexto, con el tipo de suelo, región climática, precipitaciones locales, pendiente, y la historia del uso de la tierra que pueden influir en la cantidad de COS almacenado (Waring *et al.*, 2013).

La fuente de información sobre la distribución espacial de los suelos es el levantamiento de suelos. La implementación de criterios geomorfológicos en el levantamiento permite mejorar la identificación y la delimitación de suelos, al mismo tiempo que la racionalidad del enfoque geopedológico contribuye a compensar o substituir parcialmente lo que Hudson (1992)

llama la adquisición de conocimiento tácito para la aplicación del paradigma suelo-paisaje, esta integración facilita la lectura del paisaje, porque el contexto geomorfológico controla, en una amplia proporción, los tipos de suelo asociados así como sus propiedades incluyendo al carbono.

5.1.1 Unidades morfopedológicas

Para fines de este trabajo se delimitaron nueve unidades geomorfológicas, con base a la fotointerpretación y el empleo de la visión estereoscópica; además de esto, se utilizó como base para el análisis los métodos morfométricos que permiten analizar el relieve a través de una serie de métricas como modelo digital de elevación, orientación de laderas y la pendiente, esta última sirvió para el trazado de unidades pues se usó la ruptura de pendiente para delimitar las formas.

Estas geoformas se distribuyen de la siguiente forma dentro de la microcuenca del río La Plancha: con la mayor superficie ocupada por el Lomerío con 1001.6 ha, seguida de la Montaña ligeramente disectada ocupa 838.7, Planicie aluvial 705.7 ha, Montaña disectada 603.1 ha, Piedemonte 457.7 ha, Lomerío disectado 325.10 y Lomerío ligeramente disectado 248.6 ha (Figura 25).

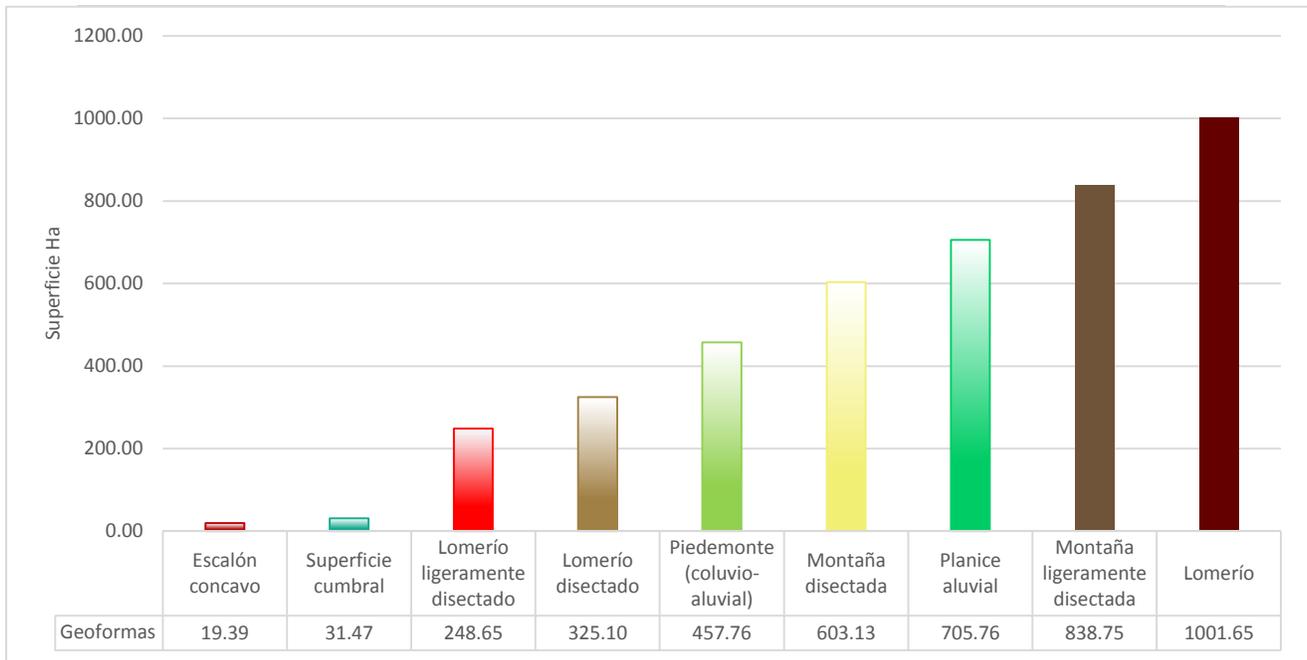
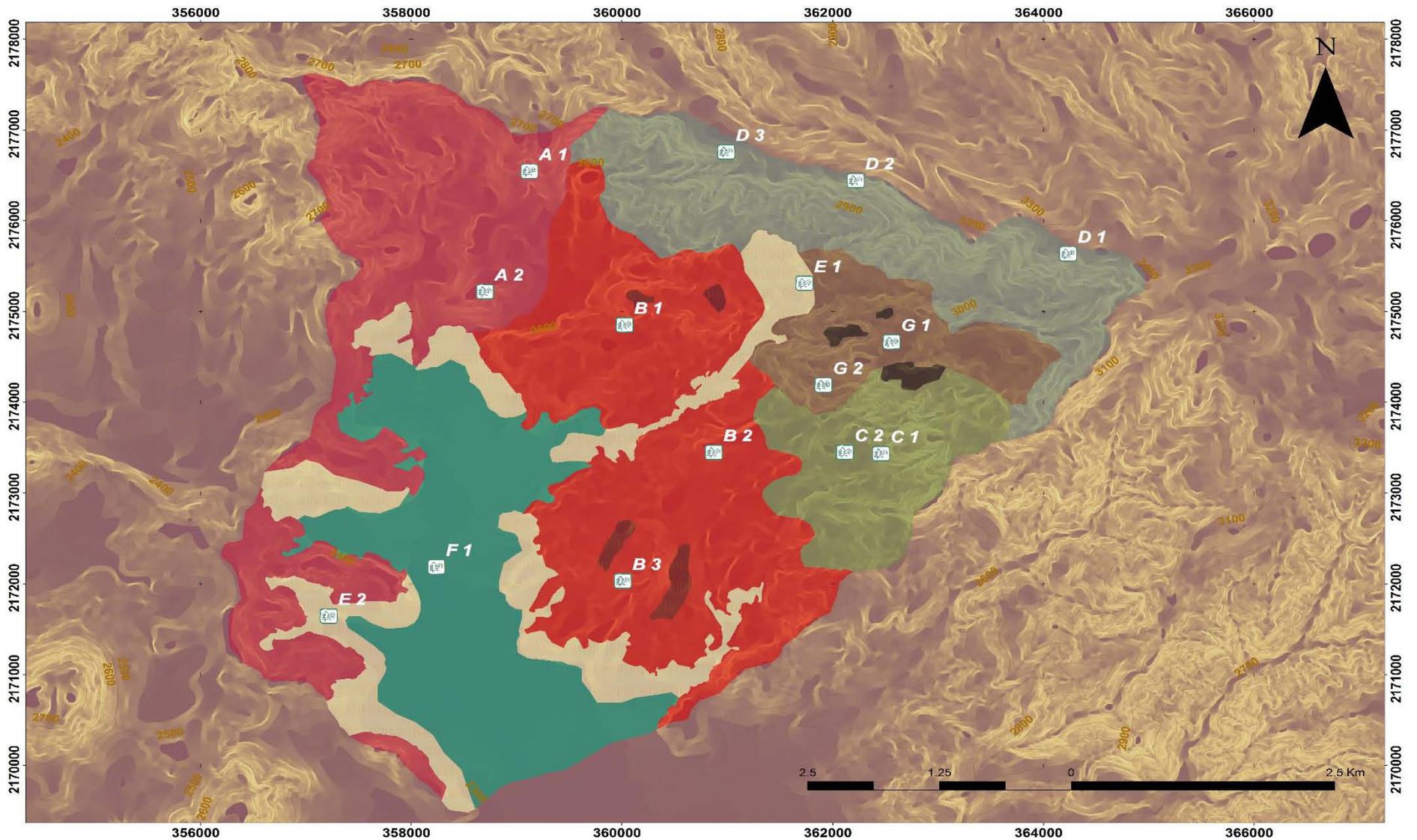


Figura 25. Superficie en hectáreas ocupada por las geoformas dentro de la microcuenca del Río La Plancha

Una vez delimitadas estas unidades se emplea el uso del criterio geomorfológico para facilitar la selección de sitios representativos, independientemente del esquema de muestreo implementado. En el muestreo orientado, los sitios de observación se pre-seleccionan con base a criterios geomorfológicos. El muestreo al azar sólo tiene sentido si se aplica en el marco de unidades previamente establecidas con criterios geomorfológicos. Con la finalidad de recabar información pedológica para la caracterización en el área en estudio se implementó el muestreo de 15 perfiles que se distribuyeron en las diferentes unidades, con dicha información se complementó el análisis y realizó la descripción geopedológica (Figura 26).



LEYENDA TEMÁTICA

Unidades geomorfológicas

- Montaña ligeramente disectada
- Montaña disectada
- Lomerío
- Lomerío disectado

- Lomerío ligeramente disectado
- Piedemonte (colivio-aluvial)
- Planicie aluvial
- Superficie cumbral
- Escalón concavo

SÍMBOLOS CONVENCIONALES

- Unidades de muestreo
- Curvas de nivel (equidistancia 100m)

INFORMACIÓN GEODÉSICA

Proyección.....UTM
 Datum horizontal.....NAD27
 Zona.....14N
 Meridiano central.....-99°
 Meridiano base.....Greenwich

UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS MICROCUENCA RÍO LA PLANCHA



Elaboró Mavíael Sarai Velázquez Quintana

Figura 26. Mapa unidades geomorfológicas y muestreos en la microcuenca del Río La Plancha

Montaña disectada (MD) representa la unidad con mayor altitud, va de los 2500-3400 m , con pendientes fuertes $>30^\circ$; se localiza en la parte noreste de la cuenca dentro del complejo Sierra Chincua, los materiales que lo conforman son principalmente rocas volcánica extrusiva del tipo Andesita que data del Mioceno 17.6 y 13.1 Ma. Los suelos son poco desarrollados (<80 cm), asociados a las fuertes pendientes que exhiben las laderas, presentan una estructura de migajón y subangular en bloques lo que le confiere una estabilidad de agregados de débil a moderada. Las clases texturales predominantes son francas limosas y limosas. Los procesos pedogenéticos relevantes son acumulación de materia orgánica en los horizontes Ah, formación de minerales secundarios de bajo orden estructural (positivo en presencia de aluminio activo) y la formación de poca estructura en horizontes Bw.

Montaña ligeramente disectada (MLD) se localiza en el noroeste de la cuenca del río La Plancha con una altitud de 2400-2800 m, las pendientes predominantes son fuertes $< 33^\circ$; está conformada por dos materiales litológicos al norte por rocas volcánicas extrusivas del tipo andesita y al sur por brecha andesítica. Los suelos al sur de esta unidad son incipientes con alta pedregosidad en superficie, textura franco limosa, los procesos pedogenéticos dominantes son formación de estructura. Por otro lado, los suelos al norte de esta unidad tienen un mayor desarrollo (170 cm) presencia de grietas en superficie, a pesar de tener estructura subangular la estabilidad de agregados es baja, los procesos pedogenéticos

predominantes son acumulación de materia orgánica, formación de estructura y formación de minerales secundarios tipo alófono.

Lomerío (L) se caracteriza por tener un rango altitudinal de 2400-2500 m con pendientes poco pronunciadas $< 20^\circ$, está conformado en su mayoría por brecha volcánica. Los lomeríos presentan suelos franco limosos, desarrollados 80-120 cm poco pedregosos, los procesos predominantes son iluviación de arcillas, procesos de óxido reducción y formación de estructura suangular y angular en bloques.

Lomerío ligeramente disectado (LLD) esta unidad se localiza al este de la microcuenca presenta una altitud de 2600-3700 m, laderas con pendientes de menos de 40° ; material parental andesítico que data del Mioceno 17.6 y 13.1 Ma, clases texturales franca arenosa y franco limosa, los procesos pedogenéticos dominantes son la acumulación de materia orgánica en superficie, formación de minerales de bajo orden estructural.

Lomerío disectado (LD) esta unidad geopedológica se encuentra al este de la cuenca se caracteriza por tener una altitud que va de los 2500-2900 m sus vertientes tienen pendientes de hasta 43° ; los materiales litológicos son al norte de la unidad rocas volcánicas extrusiva del tipo andesita y en la parte sur por brecha volcánica. Esta unidad presenta suelos más desarrollados (200 cm) al sur donde se encuentran las menores pendientes, suelos franco limosos presencia de óxido reducción coloraciones rojizas en horizontes Bw, formación de estructura tipo

fragmentos. Por otro lado los suelos en el norte de esta unidades se caracterizan por tener desarrollo incipiente, texturas franco arcillo limosas, neoformación de minerales de bajo orden estructural (positivo Al activo).

Piedemonte volcánico coluvio-aluvial (PM) los suelos en esta unidad están formados a partir de material coluvión proveniente de la montaña que delimita a la microcuenca de la parte norte y de lomeríos al oeste de la misma, con materiales de origen volcánico andesita y brecha. Los suelos tienen desarrollo heterogéneo ya que en la parte oeste presentan menor desarrollo y una alta pedregosidad mientras que al este los suelos como principales características; estructura subangular, textura limosa. Presenta pérdida de estructura en horizontes superficiales debido a las técnicas de labranza que se emplean además de presencia de minerales de bajo orden estructural.

Planicie aluvial (PA) suelos formados por recientes depósitos de acumulación aluvial (Qal) representados por eventos del Holoceno, con pendientes menores a 3° estructura masiva en superficie, procesos pedogenéticos importantes influencia antropógena con una acumulación de artefactos después de 40 cm, adición de materia orgánica por aguas residuales, formación de minerales de bajo orden estructural, presencia de nivel freático a los 117 cm.

En términos generales, se puede distinguir suelos relacionados con material parental de origen andesítico y con reacción positiva en la prueba

de Al activo en la parte noreste de la cuenca incluyendo las geoformas Montaña disectada, al Norte de la Montaña ligeramente disectada, Lomerío ligeramente disectado y en la parte Norte del Lomerío disectado. Mientras que en la parte más bajas los suelos presentan dominancia de procesos de eluviación de arcillas, material parental brecha volcánica en algunos casos desarrollo incipiente. En la región sur la planicie aluvial está muy influenciada por actividades agrícolas y la presencia de minerales de bajo orden estructural.

Tabla 10. Caracterización de los sitios de muestreo en la microcuenca del río La Plancha.

*Acronímico	Tipo de vegetación o uso de suelo	Árboles / ha	DA cm	Densidad de cobertura	Unidad geomorfológica	Material parental	Altitud m	Pendiente °	Temperatura media °C	Precipitación media mm	Ejido
MDA-O (D1)	Bosque de Oyamel	850	91.40	Cerrada		Andesita	3323	15.8	7.8	720.3	Cerro Prieto
MDA-OE (D2)	Bosque Oyamel-Encino	310	117.81	Cerrada	Montaña disectada	Andesita	3165	37.7	10.9	800	Jesús Nazareno
MDA-PR (D3)	Bosque de Pino Roble	550	70.13	Semicerrada		Andesita	2945	24.2	13.2	850.3	Rincón de Soto
MLDA-EP (A1)	Bosque Encino Pino	460	42.73	Cerrada		Andesita	2473	24.2	16.9	896.5	P. privada
MLD-P (A2)	Bosque de Pino	2440	40.18	Semiabierta	Montaña ligeramente disectada	Brecha volcánica	2566	42.4	17.9	900.6	P. privada
L-E(B1)	Bosque de Encino	1300	49.07	Cerrada			2571	11.8	17.7	873.9	Rondanilla
L-R (B2)	Bosque de Roble	780	54.08	Semiabierta	Lomerío	Brecha volcánica	2537	12.1	18	873.4	Hervidero y Plancha
L-PE (B3)	Bosque de Pino Encino	300	80.10	Semiabierta			2357	25.1	20.8	943.8	Rondanilla
LLDA-P (G1)	Bosque de Pino	830	85.33	Semiabierta	Lomerío ligeramente disectado	Andesita	2861	13	13.4	785	Hervidero y Plancha
LLDA-PR (G2)	Bosque de Pino Roble	1040	46.71	Semiabierta		Andesita	2662	13.6	15.5	819	Hervidero y Plancha
LDAP (C1)	Bosque de Pino	1150	26.47	Abierta	Lomerío disectado	Andesita	2656	32.7	16.1	815.9	Hervidero y Plancha
LD-Ag (C2)	Agrícola	-----	-----	-----		Brecha volcánica	2633	12.8	16.7	828.8	Hervidero y Plancha
PMA-Ag (E1)	Agrícola	-----	-----	-----		Andesita Coluvial	2681	13.4	15.7	814.4	Hervidero y Plancha
PM-Ag (E2)	Agrícola	-----	-----	-----	Piedemonte	Andesita-Brecha volcánica Coluvial	2319	5	21.9	984.2	Rondanilla
PA-Ag (F1)	Agrícola	-----	-----	-----	Planicie aluvial	Aluvial	2320	2	21.6	963.3	Hervidero y Plancha

*La letra A simboliza que el material parental es Andesita

Tomando como base esta información en este capítulo, se realizó la revisión de la distribución del carbono orgánico en el suelo bajo dos enfoques, el primero con el objetivo de analizar la diferenciación del contenido en cada horizonte y como se relaciona con otras propiedades y los procesos pedogenéticos. El segundo análisis consistió en identificar como se distribuyen espacialmente con el objetivo de identificar regiones “Hot-points” dentro de la microcuenca del río La Plancha.

5.1.2 Distribución vertical del carbono orgánico del suelo

El contenido de carbono en los suelos derivados de brecha volcánica fue alto para los perfiles en sus horizontes superficiales, tal es el caso del perfil LD-Ag con 6%, L-R presentó 4.6% de carbono y PM-Ag con 4.6% en sus horizontes Ah y Ap, mientras que se obtuvieron concentraciones de carbono medio-alto en L-E 3.8% de carbono, en el perfil L-PE 2.8% y MLD-P fue 2.15 en su horizonte Ah. Para el caso de los suelos derivados de roca andesítico se presentaron valores altos de carbono para el caso de los perfiles MDA-O con 12.6% en su horizonte Ah₂, MDLA-EP 9% de carbono, mientras que los valores más bajos se presentaron en sitios LLDA-PR con 1.7% y 1% de carbono en el perfil LDA-BP.

Esta acumulación de carbono orgánico mostró una correlación de -0.52 con relación a la profundidad, lo que indica que a menor profundidad el contenido de carbono será menor; además, el contenido arcillas mostró un -0.45 de correlación con respecto a la acumulación de COS.

Tabla 11. Coeficiente de correlación de Pearson entre las variables y su distribución vertical en suelo derivados de Brecha volcánica (sin reacción positiva de Al activo).

	Profundidad cm	Densidad Aparente (g cm ⁻³)	Pedregosidad (%)	pH	COS%	Aluminio P%	Arenas%	Limo%	Arcilla%
Profundidad cm	1	-0.003	0.264	-0.023	-0.526	-0.031	-0.504	0.513	0.197
Densidad Aparente (g cm ⁻³)	-0.003	1.	0.411	-0.377	-0.321	0.076	0.248	-0.301	0.096
Pedregosidad (%)	0.264	0.411	1	0.115	-0.187	-0.146	0.193	-0.173	-0.171
pH	-0.023	-0.377	0.115	1	0.262	-0.235	-0.161	0.206	-0.106
COS%	-0.526	-0.321	-0.187	0.262	1	-0.097	0.438	-0.374	-0.455
Aluminio P%	-0.031	0.076	-0.146	-0.235	-0.097	1	-0.007	-0.020	0.110
Arenas%	-0.504	0.248	0.193	-0.161	0.438	-0.007	1	-0.978	-0.550
Limo%	0.513	-0.301	-0.173	0.206	-0.374	-0.020	-0.978	1	0.362
Arcilla%	0.197	0.096	-0.171	-0.106	-0.455	0.110	-0.550	0.362	1

Comparando estos datos con la literatura se esperaría que el contenido de arcilla influyera en la acumulación de carbono positivamente pues se ha reportado en horizontes más profundos el contenido de arcilla, mientras que en horizontes más superficiales el clima es el factor explicativo (Post *et al*, 1982). Esto puede deberse a que el contenido de arcilla no sea tan alto pues el tamaño de partícula dominante en los diferentes suelos sea el limo, entonces la poca arcilla no genera una macroagregación para la protección física de la materia orgánica (Caner *et al.*, 2010).

Las demás variables no mostraron alta correlación en profundidad a excepción de las arenas que se correlacionaron negativamente -0.50 es decir en horizontes más profundos hay evidencia de tamaños de partículas menos gruesos tipo limo y arcilla en donde la arcilla ha sido eluviada.

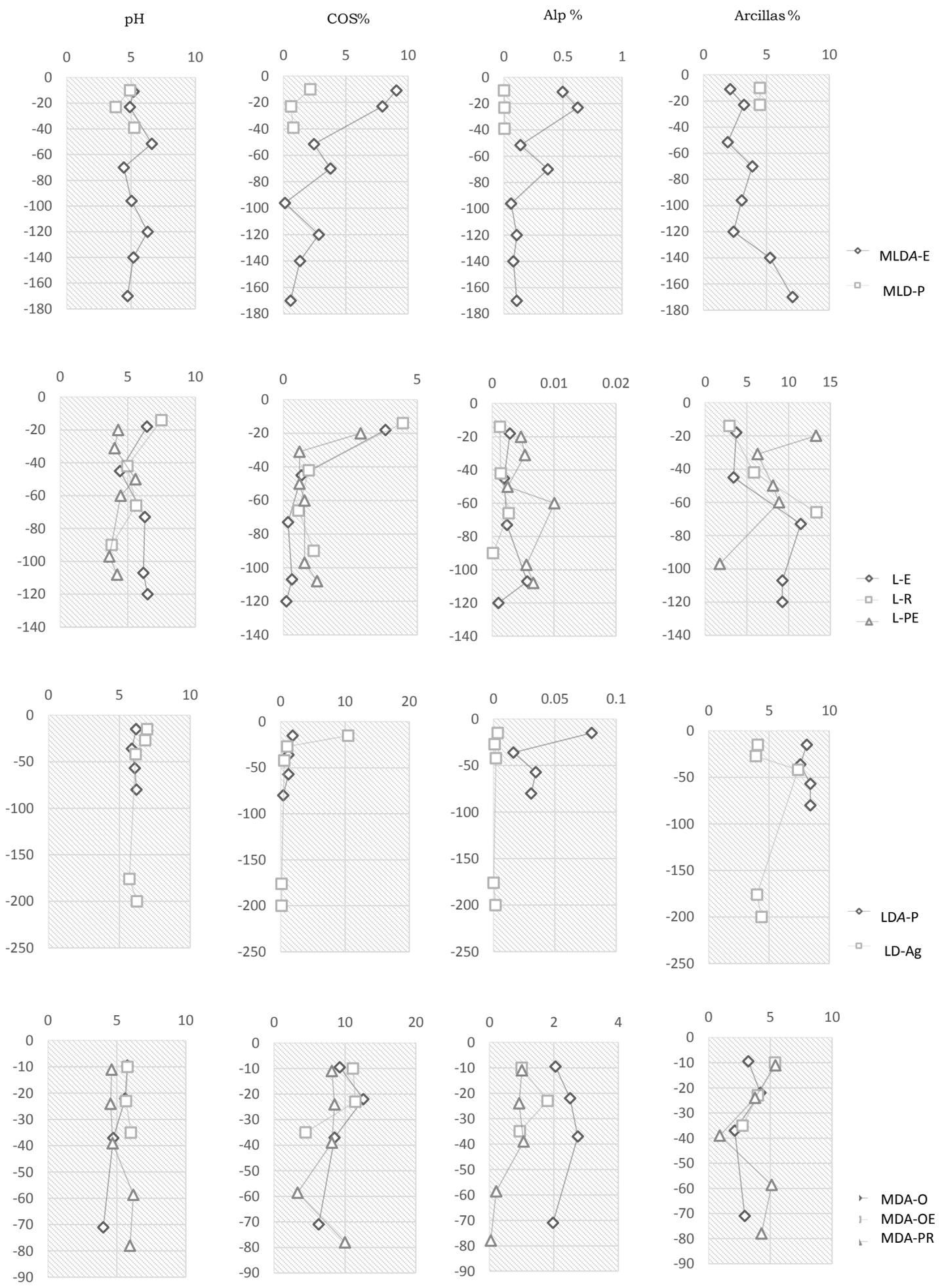
Para el caso de los suelos derivados de andesitas se presentó mayor correlación negativa a profundidad igual a -0.64, además de una correlación positiva con el aluminio extractable con pirofosfato 0.51 lo que indica que el aluminio cumple un papel importante al estabilizar el carbono en el suelo. Esto queda evidenciado en los horizontes que presentaron mayor carbono son aquellos en donde también el aluminio extractable con pirofosfato es alto como el caso de MDA-O con 12.6% de carbono y 2.5 % de Alp.

Tabla 12. Coeficiente de correlación de Pearson entre las variables y su distribución vertical en suelo derivados Andesita (reacción positiva de Al activo)

Columna1	Profundidad cm	Densidad Aparente (g cm ⁻³)	Pedregosidad (%)	pH	COS%	Aluminio P%	Arenas%	Limos%	Arcilla%
Profundidad cm	1	0.238	0.258	-0.041	-0.644	-0.363	-0.112	0.112	0.063
Densidad Aparente (g cm ⁻³)	0.238	1	-0.082	0.053	-0.379	-0.147	0.432	-0.439	-0.203
Pedregosidad (%)	0.258	-0.082	1	-0.282	0.012	-0.053	0.018	-0.052	0.204
pH	-0.041	0.053	-0.282	1	-0.244	-0.123	-0.103	0.129	-0.106
COS%	-0.644	-0.379	0.012	-0.244	1	0.519	-0.151	0.118	0.293
Aluminio P%	-0.363	-0.147	-0.053	-0.123	0.519	1	-0.347	0.351	0.176
Arenas%	-0.112	0.432	0.018	-0.103	-0.151	-0.347	1	-0.992	-0.626
Limos%	0.112	-0.439	-0.052	0.129	0.118	0.351	-0.992	1	0.523
Arcilla%	0.063	-0.203	0.204	-0.106	0.293	0.176	-0.626	0.523	1

En general se encontró, una correlación negativa en cuanto al contenido de carbono y la profundidad; sin embargo, esta correlación no resultó ser

tan alta y este resultado se explica por el hecho que el decremento COS no es linealmente y más frecuentemente se basa en el modelo de una función exponencial Figura 27 (Hilinski, 2001). Sin embargo, este comportamiento exponencial se ve más claramente en pastizales y menos clara en bosque (Omonode & Vyn, 2006). De esta forma, es difícil encontrar una función que ajuste para cada sitio ya que presentan condiciones heterogéneas tanto por el tipo de suelo, la vegetación y el uso histórico en cada sitio. Sin embargo, se puede destacar la presencia del Al como estabilizador del carbono ya que se encuentra vinculados es decir en los sitios que se presentó más alto también el carbono.



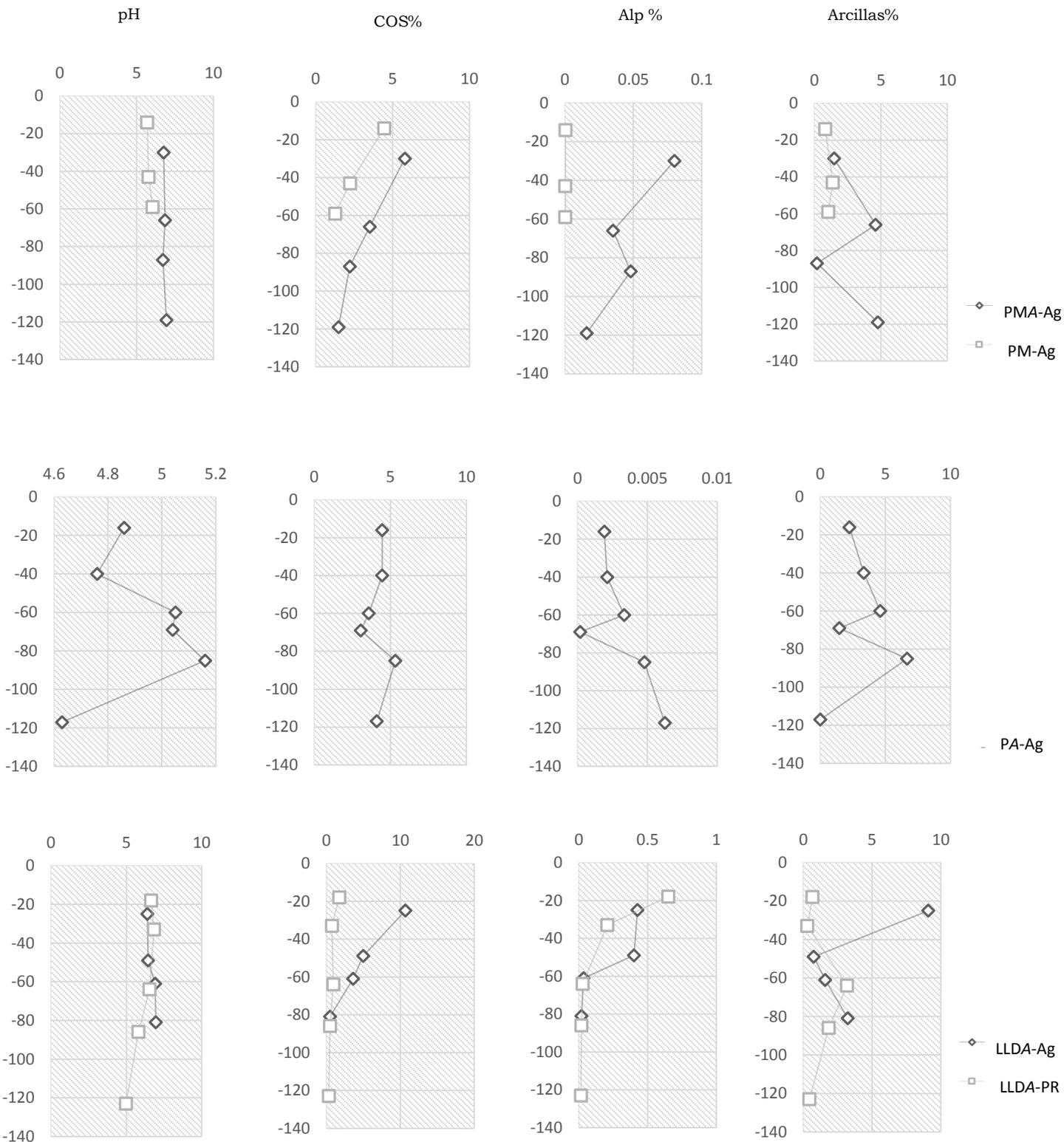


Figura 27. Relación de las variables pH, carbono orgánico, aluminio y arcillas con la profundidad

MDA-O Montaña disectada, andesítica con bosque de oyamel
 MDA-OE Montaña disectada, andesítica con bosque de oyamel-encino
 MDA-PR Montaña disectada, andesítica con bosque de pino y roble
 MLDA-EP Montaña ligeramente disectada, andesítica con bosque encino-pino
 MLD-P Montaña ligeramente disectada con bosque de pino

L-E Lomerío con bosque encino
 L-R Lomerío con bosque de roble
 L-PE Lomerío con bosque de pino- encino
 LLDA-P Lomerío ligeramente disectado andesítico, con bosque de pino
 LLDA-PR Lomerío ligeramente disectado andesítico, con bosque de pino roble
 LDA-P Lomerío disectado, andesítico con bosque de pino
 LD-Ag Lomerío disectado, con agricultura

PMA-Ag Piedemonte andesítico con agricultura
 PM-Ag Piedemonte con agricultura
 PA-Ag Planicie aluvial con agricultura

Tabla 13. Propiedades físicas y químicas en el suelo

Horizonte	Profundidad (cm)	Densidad Aparente (g cm ⁻³)	Pedregosidad (%)	pH	MO%	CO ₂ %	Al _p %	Arena	Limo (%)	Arcilla	Textura	Estructura Tipo
Montaña ligeramente disectada , bosque de Encino-Pino (LDA-EP)												
Ah	0-11	0.66	0	5.2	15.63	9.07	0.497	48.66	49.22	2.13	CL	masiva
Ah2	11-23	0.72	0	4.91	13.68	7.93	0.625	44.23	52.56	3.21	CL	subangular en bloques
Bw1	23-43/60	0.82	1	6.61	4.23	2.45	0.140	53.28	44.80	1.92	CL	subangular en bloques
Bw2	43-70	0.73	0	4.44	6.50	3.77	0.371	44.95	51.17	3.88	CL	angular en bloques
Bw3	70-96	0.81	4	5.04	0.20	0.12	0.060	40.44	56.53	3.04	CL	angular en bloques
2Bw	96-120	0.82	4	6.29	4.88	2.83	0.108	54.09	43.52	2.39	CA	subangular en bloques
2Bw2	120-140	0.93	20	5.18	2.28	1.32	0.080	45.18	49.54	5.28	CL	subangular en bloques
C	140-170	0.94	40	4.73	0.98	0.57	0.108	21.64	71.28	7.08	CL	angular en bloques
Montaña ligeramente disectada, bosque Pino (MLD-P)												
Ah	0-10	0.96	1	4.92	3.70	2.15	0.0010	47.17	48.35	4.48	CL	subangular en bloques
B1	10-23	1.34	10	3.8	1.04	0.60	0.0050	40.90	54.62	4.48	CL	subangular en bloques
C	23-37/41	1.34	20	5.25	1.37	0.79	0.0042	61.62	31.50	6.87	CA	subangular en bloques
Lomerío,, bosque Encino (L-E)												
Ah	0-18	0.76	1	6.41	6.58	3.82	0.0029	36.30	59.98	3.71	CL	subangular en bloques
Ah2	18-45	0.82	1	4.42	1.18	0.68	0.0019	32.86	63.74	3.39	CL	subangular en bloques
Bt1	45-73	0.94	0	6.26	0.30	0.17	0.0024	17.06	71.49	11.45	CL	angular en bloques
Bt2	73-107	0.93	0	6.15	0.56	0.33	0.0057	17.76	72.98	9.26	CL	angular en bloques
C	107-120	0.94	0	6.47	0.19	0.11	0.0010	16.50	74.24	9.26	CL	angular en bloques
Lomerío, bosque de Roble (L-R)												
Ah	0-14	0.72	0	7.48	7.70	4.46	0.0012	37.12	59.98	2.90	CL	subangular en bloques
BA	14-42	0.84	0	4.96	1.63	0.95	0.0014	36.58	57.58	5.84	CL	subangular en bloques
Bt1	42-66	0.88	0	5.61	0.97	0.56	0.0027	12.10	74.58	13.32	L	subangular en bloques
Bt2	66-90	0.89	0	3.81	1.95	1.13	0.0002	10.75	75.97	13.28	L	subangular en bloques
Lomerío, bosque Pino –Encino (PE)												
Ah1	0-20	0.92	0	4.28	4.98	2.89	0.0046	35.13	58.61	6.26	CL	angular en bloques
BA	20-31	0.98	0	4.02	1.04	0.60	0.0053	26.20	65.68	8.12	CL	angular en bloques
Bt1	31-50	0.89	0	5.57	1.04	0.60	0.0249	25.42	65.74	8.84	CL	subangular en bloques
Bw	50-60	0.88	0	4.47	1.36	0.79	0.0100	32.38	65.87	1.74	CL	subangular en bloques
Bt2	60-97	0.95	0	3.64	1.36	0.79	0.0055	25.54	67.17	7.29	CL	subangular en bloques
C	97-108	1.27	0	4.2	2.17	1.26	0.0066	29.48	65.20	5.32	CL	subangular en bloques

Tabla 13. Continuación

Horizonte	Profundidad (cm)	Densidad Aparente (g cm ⁻³)	Pedregosidad (%)	pH	MO%	CO ₂ %	Al _p %	Arena	Limo (%)	Arcilla	Textura	Estructura Tipo
Lomerío ligeramente disectado andesita, bosque Pino (LDA-P)												
Ah1	0-15	0.96	0	6.18	1.85	1.07	0.080	21.11	70.77	8.12	CL	subangular en bloques
Ah2	15-36	0.96	5	5.89	1.20	0.70	0.016	21.78	70.62	7.60	CL	subangular en bloques
Bw	36-57	1.09	7	6.1	1.20	0.70	0.034	20.62	70.96	8.42	CL	subangular en bloques
C	57-80	0.97	7	6.21	0.40	0.23	0.030	31.06	60.51	8.42	CL	subangular en bloques
Lomerío disectado, agricultura (LD-Ag)												
Ap	0-15	0.84	1	6.96	10.50	6.09	0.0036	27.10	68.85	4.06	CL	fragmentos
Bp	15-27	0.94	5	6.83	1.02	0.59	0.0010	3.32	92.77	3.91	L	fragmentos
Bt	27-42	0.95	3	6.16	0.58	0.33	0.0020	24.30	68.29	7.41	CL	fragmentos
Bw2	42-176	0.89	0	5.71	0.13	0.07	0.0002	7.61	88.40	3.99	L	fragmentos
C	176-200	0.87	25	6.24	0.13	0.07	0.0017	13.24	82.38	4.38	L	fragmentos
Montaña disectada andesita, bosque Oyamel (MDA-O)												
Ah1	0-9.5	0.84	0	5.75	15.98	9.27	2.053	48.89	47.89	3.22	CL	migajon
Ah2	9.5-22	0.75	0	5.6	21.72	12.60	2.502	56.87	38.93	4.20	CA	migajon
AC	22-37	0.76	2	4.74	14.70	8.53	2.743	57.54	40.34	2.12	CA	migajon
AC	37-71	0.86	60	4.01	10.86	6.30	1.973	54.69	42.37	2.94	CA	migajon
Montaña disectada andesita, bosque Oyamel-Ecino (MDA-OE)												
Ah	0-10	0.67	3	5.77	19.2	11.1	1.001	10.70	83.90	5.39	L	migajon
Ah2	10-23	0.76	20	5.67	19.8	11.5	1.805	45.16	50.83	4.00	CL	migajon
AC	23-35	0.86	50	6.01	7.7	4.4	0.939	52.04	45.22	2.74	CL	migajon
Montaña ligeramente disectada andesita, bosque Pino-Roble (MLDA-PR)												
Ah1	0-11	0.67	1	4.62	14.06	8.15	1.003	42.23	52.35	5.42	CL	subangular en bloques
Ah2	11-24	0.76	1	4.55	14.70	8.53	0.920	45.87	50.37	3.76	CL	subangular en bloques
Bh	24-38/40	0.76	0	4.69	14.06	8.15	1.055	55.54	43.55	0.91	CL	subangular en bloques
Bw	40-66/56/54	0.90	30	6.19	5.75	3.34	0.208	31.98	62.90	5.12	CL	subangular en bloques
C	56-78	0.89	60	5.95	17.25	10.01	0.415	50.89	44.83	4.28	CA	subangular en bloques
Piedemonte andesita, agricultura (PMA-Ag)												
Ap	0-30	0.80	0	6.75	9.99	5.79	0.080	51.65	46.85	1.50	CA	migajon
AB	30-66	0.80	0	6.85	6.07	3.52	0.035	19.76	75.63	4.60	L	subangular en bloques
BC	66-87	0.84	0	6.71	3.83	2.22	0.047	35.00	64.80	0.20	CL	subangular en bloques
C	87-119	0.80	7	6.94	2.55	1.48	0.015	32.62	62.61	4.78	CL	angular en bloques
Piedemonte, agricultura (PM-Ag)												
Ap	0-14	0.91	5	5.69	7.68	4.45	0.0004	58.41	40.77	0.82	CA	subangular en bloques
Ap2	14-43	0.90	2	5.77	3.84	2.23	0.0002	56.94	41.66	1.40	CA	subangular en bloques
C	43-59	0.95	7	6.04	2.18	1.26	0.0002	45.42	53.52	1.06	CL	subangular en bloques

Tabla 13. Continuación

Horizonte	Profundidad (cm)	Densidad Aparente (g cm ⁻³)	Pedregosidad (%)	pH	MO%	C0%	Al _p %	Arena	Limo (%)	Arcilla	Textura	Estructura Tipo
Planicie aluvial, agricultura (PA-Ag)												
Ap1	0-16	0.90	10	4.86	7.68	4.45	0.192	55.12	42.62	2.25	CA	masiva
Ap2	16-40	0.90	40	4.76	7.68	4.45	0.211	57.18	39.47	3.35	CA	subangular en bloques
Bw	40-60	0.79	10	5.05	6.18	3.58	0.333	39.72	55.66	4.62	CL	subangular en bloques
BC	60-69	1.49	20	5.04	5.27	3.06	0.090	65.28	33.25	1.47	CA	subangular en bloques
2Bt	69-85	0.81	10	5.16	9.19	5.33	0.477	36.60	56.72	6.68	CL	subangular en bloques
2Bw	85-117	0.86	10	4.63	7.08	4.11	0.625	43.03	56.96	0.01	CL	subangular en bloques
Lomerío ligeramente disectado andesita, bosque Pino (LLDA-P)												
Ah1	0-33/17	0.70	0	6.39	18.38	10.66	0.426	31.19	59.71	9.10	CL	subangular en bloques
Ah2	17-49	0.78	0	6.45	8.59	4.98	0.400	56.75	42.48	0.77	CL	subangular en bloques
Bw	49-52/70	0.89	0	6.91	6.18	3.58	0.035	43.94	54.45	1.61	CL	subangular en bloques
C	52-81	0.91	1	6.95	0.82	0.47	0.019	36.36	60.40	3.24	CL	subangular en bloques
Lomerío ligeramente disectado andesita, bosque Pino-Roble (LLDA-PR)												
Ah1	0-18	0.94	0	6.65	2.94	1.71	0.651	48.83	50.50	0.68	AC	subangular en bloques
Ah2	18-33	1.13	1	6.84	1.29	0.75	0.208	79.56	20.13	0.31	AC	subangular en bloques
AC	33-64	0.93	5	6.54	1.59	0.92	0.028	60.08	36.72	3.20	CA	masiva
AC2	64-86	0.90	0	5.8	0.83	0.48	0.019	67.01	31.12	1.87	CA	masiva
C1	86-123	0.87	10	4.97	0.53	0.31	0.015	73.05	26.50	0.45	AC	subangular en bloques

La distribución de carbono a profundidad presentó diferenciación entre los sitios; cómo se logra observar en la Figura 28, al comparar a una profundidad de 30 cm los suelos formados a partir de roca andesítica denotados con la letra A, a esta profundidad el carbono representó del 35.61% al 69.13% del total, descartando al MDA-OE pues se trata de un suelo con poco desarrollo, lo que nos indica que se puede encontrar un importante reservorio de carbono a más profundidad en estos suelos. En el

caso de la región de Montaña disectada presentó en el muestreo MDA-O el 59.55% de carbono a 30 cm, mientras que MDA-PR 43.62%.

Sin embargo, para el caso de los suelos derivados de brecha volcánica el carbono a 30 cm representó del 44.4 % al 93.17% del total, esto indica que en la mayoría de estos sistemas el carbono en el suelo principalmente se localiza en esta profundidad y muy poco se encuentra a profundidades mayores. El caso más drástico fue precisamente en LD-Ag que fue donde se presentó el mayor contenido de carbono orgánico en el suelo en esta profundidad.

Para los muestreos ubicados en el Lomerío a pesar de presentar un importante desarrollo del perfil y formación de estructura sólo en la superficie donde se concentra el carbono en 30 cm de profundidad para el L-E representa 87.67% y L-R tiene el 76.03% mientras que para el caso del L-PE acumula en esta profundidad el 49% del carbono total esto se relaciona con el papel del aluminio extraíble con pirofosfato es mayor que en los otros dos sitios en la superficie. Este hecho se ha reportado en otros Luvisoles pues el carácter ándico en superficie ocurre como consecuencia por rejuvenecimiento por aportes piroclásticos recientes o por constituir fases erosivas de andosoles (Rodríguez *et al.*, 2004).

En cuanto a los sitios ubicados en el Lomerío disectado presentó los dos tipos de roca tanto brecha volcánica (LD-Ag) y andesita (LDA-BP) en donde hay una clara diferenciación del contenido de carbono a 30 % en el primer

caso representa el 93.17% y en el suelo derivado de andesita es 65.16% esto no se relaciona directamente con la presencia de aluminio extractable con pirofosfato, pero puede explicarse por el uso de suelo pues no hay tanta incorporación de materia orgánica a través de la vegetación y de las raíces y éste queda concentrado en la superficie (Tabla 13).

El piedemonte presenta diferente material parental PMA-Ag con roca andesítica, presentó 48.48% del carbono almacenado a los 30 cm con relación del total, mientras que en PM-Ag son suelos originados por brecha volcánica tiene el 83.68% de carbono (Figura 29) concentrado en superficie lo que indica el aluminio extraíble con pirofosfato ha estabilizado el carbono en el suelo y a pesar de presentarse agricultura en ambos sitios existe una diferencia importante.

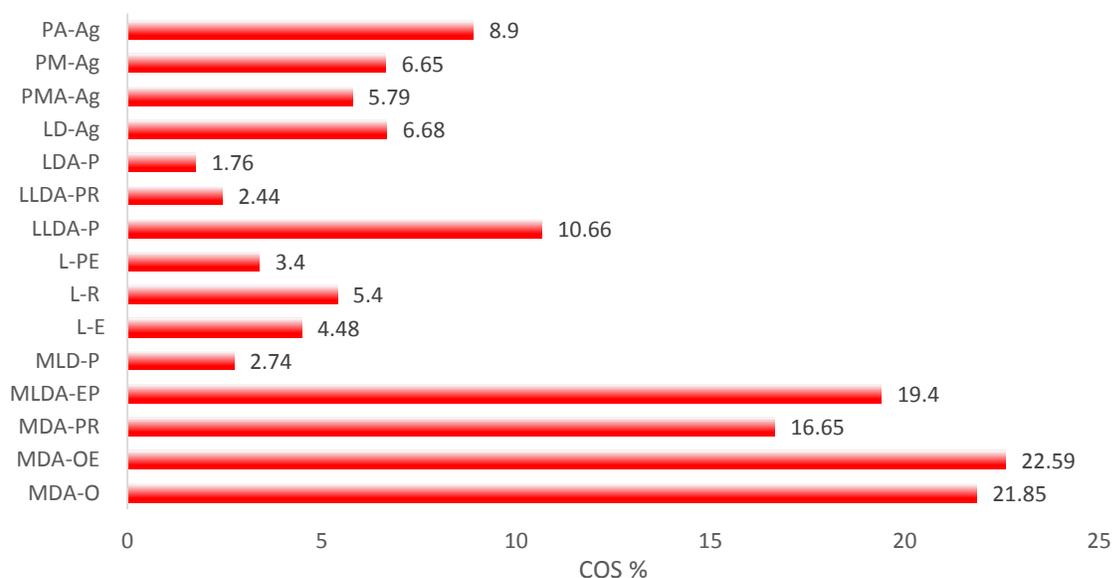


Figura 28. Carbono orgánico del suelo a 30 cm e profundidad

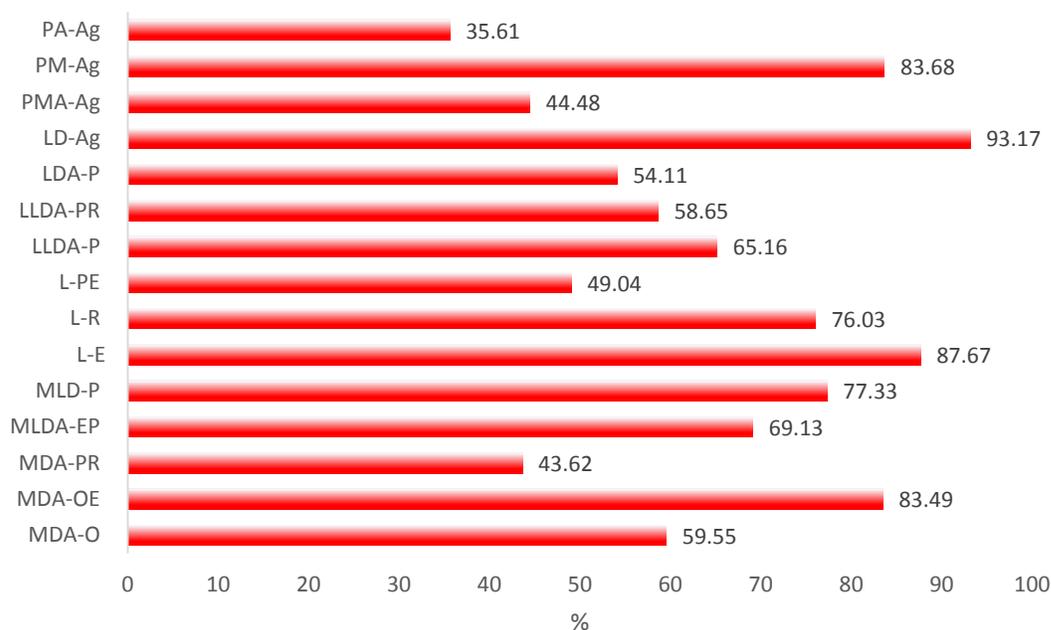


Figura 29. Porcentaje de carbono orgánico del suelo a 30 cm con relación al total

De esta manera el comportamiento de los sumideros de carbono dentro de la microcuenca del río La Plancha indicó que las unidades geopedológicas ayudaron en la caracterización de los sitios evaluados, los cuales muestran ciertos patrones en cuanto a su potencial como almacenes de carbono, además se puede resaltar en suelos derivados de andesitas la formación de complejos con Al es crucial para la estabilidad de la materia orgánica en el suelo, como se ha observado en otro sitios como Nueva Zelanda, África y Japón la formación de complejos Al y Fe-humus se favorece a pH bajos menores a 5 (Pizarro *et al.*, 2003), en donde la absorción de ligandos es a través de un intercambio dependiente de las cargas variables (Spark, 2003). Para explicar la formación de complejos Al-COS en los suelos alofánicos se debe entender la fase química en donde los grupos hidroxilo

se atraen por protones sueltos en función del pH del suelo, la reacción es compensada por interacciones electroestáticas con Na^+ o cationes como Al^{+3} , promoviendo la absorción por la materia orgánica (Matus *et al*, 2009). Es por ello que en suelos derivados de roca andesítica se encontraron suelos con mayor carbono como almacén, destacando la presencia en horizontes superficiales de más del 35.61% del total estos suelos ubicados en la parte alta de la microcuenca.

Mientras que los suelos derivados de brecha volcánica presentaron almacenes menores y con una importante concentración de carbono, en la superficie en algunos casos más del 90% del total, lo que los convierte en regiones vulnerables pues la pérdida de estos pocos centímetros de suelo estaría comprometiendo la productividad y funcionalidad de este ecosistema. Esto debería traducirse en mejores prácticas para evitar la pérdida del suelo sobre todo en aquellos lugares en donde se presenta agricultura, con cobertura muy abierta o regiones deforestadas y fuertes pendientes.

Así, queda claro que a profundidad de 30 cm pueden identificarse dos grupos en cuanto a contenido de carbono; aquéllos que acumulan más carbono a esta profundidad y se localizan en la parte media y centro de la cuenca con mosaicos de bosque - agricultura y el segundo con mayor carbono en la parte alta de la cuenca con bosque.

5.1.3 Distribución espacial de los reservorios de carbono orgánico del suelo

Las investigaciones relacionadas con el carbono orgánico del suelo han sido un foco principal en todo el mundo, motivados por el potencial del suelo para convertirse en un sumidero manejable del secuestro del dióxido de carbono de la atmósfera y por lo tanto para mitigar el cambio climático y los beneficios conocidos del aumento de carbono orgánico del suelo para el funcionamiento de los suelos (Budiman *et al.*, 2006). Sin embargo, los paisajes son heterogéneos y complejos así que la predicción del almacén de carbono a nivel paisaje requiere del entendimiento de cuáles son los factores que están interviniendo; hay dos grupos de factores que influyen inherente en el contenido de materia orgánica: factores naturales (clima, material parental, la cobertura del suelo y / o vegetación, tiempo y el relieve), y los factores de origen humano (uso de la tierra, la gestión y la degradación) (Yusuf & Panagos, 2014).

Los almacenes de carbono dentro de la microcuenca del río La Plancha se presentaron una distribución espacial dependientes del material parental y los usos de suelo y vegetación. Las mayores almacenes de carbono se localizan en región norte de la microcuenca donde se establecen los bosques de oyamel (MDA-O), hábitat preferencial de la mariposa monarca con un total de 330 Mg /ha de carbono mientras que el valor más bajo se presentó en bosque de pino (MLD-P) con una total de 43 Mg/ha de esta

forma el rango de distribución de los almacenes queda dado entre 330-44 Mg/ha.

Almacén de carbono en suelos de Montaña Disectada

Esta unidad se caracteriza por tener bosques cerrados-semicerrados y suelos derivados de roca andesítica con fuertes pendientes producto de la acción erosiva de los ríos. Los almacenes de carbono fueron los más altos dentro de la zona de estudio con 330.4 Mg/ha en el perfil MDA-O, seguido del MDA-PR con 321.9 Mg/ha y 186 Mg/ha en MDA-OE Tabla 14. Esta diferenciación se debe al poco desarrollo en el perfil MDA-OE en donde sólo alcanza 35 cm de profundidad y hay poco desarrollo de estructura, relacionado con una mayor pendiente (37°) además de encontrarse bajo una menor densidad de arbolado. Los horizontes predominantes para esta unidad con mayor carbono fueron los Ah, mientras que sólo para el caso de MDA-PR se presentan horizontes Bh con alto contenido de carbono.

Tabla 14. Carbono almacenado por horizonte en los muestreos en Montaña

MDA-O	COS Mg/ha	MDA-OE	COS Mg/ha	MDA-PR	COS Mg/ha
Ah1	74.34	Ah1	72.11	Ah1	59.44
Ah2	87.48	Ah2	91.32	Ah2	83.38
AC	95.14	AC1	22.83	Bh	61.58
AC	73.47			Bw	39.03
				C	78.54
MLDA-EP		MLD-P			
Ah	66.08	Ah	20.32		
Ah2	68.60	B1	9.47		
Bw1	56.71	C	13.60		
Bw2	50.81				
Bw3	2.36				
2Bw	44.46				
2Bw2	19.74				
C	9.65				

Estos resultados concuerdan con otros valores de almacenes de carbono evaluados dentro de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca en bosques de oyamel en donde se presentaron variaciones entre 199-971 Mg/ha (Pérez, 2009; Velázquez, 2012); sin embargo, Cruz (2007) reporta para la región entre Michoacán y Estados de México 150 y 1600 Mg/ ha. A nivel internacional el IPCC (2003) reporta para suelos Andosoles de 70-130 Mg/ha de carbono a una profundidad de 30 cm. Lo que indica que los resultados quedan dentro del rango; sin embargo, son más bajos de lo esperado debido precisamente a que se encuentran sobre una unidad geomorfológica de montaña con fuertes pendientes , el desarrollo del suelo es incipiente, por tanto al calcular los valores de almacén de carbono sólo a esta profundidad afecta el reservorio total.

Almacén de carbono en suelos de Montaña ligeramente disectada

La Montaña ligeramente disectada presentó un total de carbono en la parte alta de la unidad MLDA-P igual a 318 Mg/ha mientras que en la parte central sólo fue de 43.3 Mg/ha la diferencia entre estos dos sitios radicó en el material parental en donde para el primer sitio se trata de suelo desarrollado a partir de andesitas; en el segundo caso fue sobre brecha volcánica con menor desarrollo del perfil (41 cm), mayor pedregosidad en superficie, pendiente más pronunciada (42.4°) y una densidad de cobertura semiabierta con un suelo basado en la WRB (World Reference Base for Soil Resources) como Epileptic Regosol .

Además de esto para el caso del perfil MLDA-EP se encuentra un suelo sepultado en donde vuelve incrementar la concentración de carbono en este horizonte 2Bw con 44.4 Mg/ha; como lo mencionan Peña y colaboradores (2009), la depositación de cenizas y como consecuente presencia de horizontes sepultados, incrementa los valores de acumulación de carbono en suelos volcánicos.

El IPCC (2003) reporta para los suelos Regosoles una menor capacidad de almacenaje de carbono de 38-44 Mg/ha a 30 cm, mientras que Vela *et al* (2011) reporta para este tipo de suelo menos de 150 Mg/ha, lo que concuerda con lo reportado para este trabajo, para el caso de MLDA-P bajo un bosque de pino los estudios dentro de la reserva reportaron para bosque de pino conservado 364.4 Mg/ha y bosques perturbados 302.2 Mg/ha (Velázquez, 2012). De esta forma, a pesar de encontrarse en la misma unidad geomorfológica se encuentra una gran diferenciación de carbono almacenado de más de 86%.

Almacén de carbono en suelos en los Lomeríos

La unidad geomorfología de lomerío cubre un total de 1639.7 ha representado el 38% de la superficie dentro de la cuenca; por tanto, el papel de los suelos como sumidero de carbono en esta unidad es muy importante por la superficie que ocupa, en esta unidad se presenta un mosaico de coberturas boscosa y agricultura. Los Lomeríos se separaron en disectados, ligeramente disectado y en aquellos poco disectados.

Para la unidad de Lomeríos disectados se presentó carbono 44.18 Mg/ha en el sitio LDA-P y 95.8 Mg/ha en LD-Ag, estos sitios se diferenciaron por el tipo de uso del suelo y materia parental, ya que en primer sitio se trata de un bosque de pino mientras en el segundo estaba con uso agrícola que se encuentra en descanso, además de esto se diferencia la pendiente para el primer sitio se trata de 32.4 ° y en el sitio con agricultura fue de 5°; de esta forma, se presenta mayor desarrollo del perfil en LD-Ag de 200cm mientras que en LDA-BP solo fue de 80cm y en el primer sitio el material parental es de brecha volcánica mientras que en el segundo caso roca andesítica. Para el caso de LDA-P la distribución del carbono se da en todo el perfil hasta el horizonte Bw mientras que en el perfil LD-Ag se concentra en su horizonte Ap. Para el primer caso se LDA-P presenta un Andosol mientras que en el segundo perfil se considera un Chromic Luvisol.

Tabla 15. Carbono almacenado por horizonte en los muestreos en Lomeríos

L-E	COS Mg/ha	L-R	COS Mg/ha	L-PE	COS Mg/ha	LDA-P	COS Mg/ha
Ah	51.99	Ah	46.58	Ah	53.13	Ah1	15.41
Ah2	14.97	BA	22.15	BA	6.54	Ah2	13.33
Bt1	4.58	Bt1	11.88	Bt1	10.21	Bw	10.63
Bt2	10.34	Bt2	24.08	Bw	7.00	C	4.82
C	1.36			Bt2	27.85		
				C	17.54		
LLDA-P		LLDA-PR		LD-Ag			
Ah1	186.61	Ah1	28.86	Ap	75.79		
Ah2	93.35	Ah2	12.55	Bp	5.30		
Bw	38.08	AC	25.38	Bt	4.63		
C	4.30	AC2	9.62	Bw1	8.86		
		C1	8.95	C	1.26		

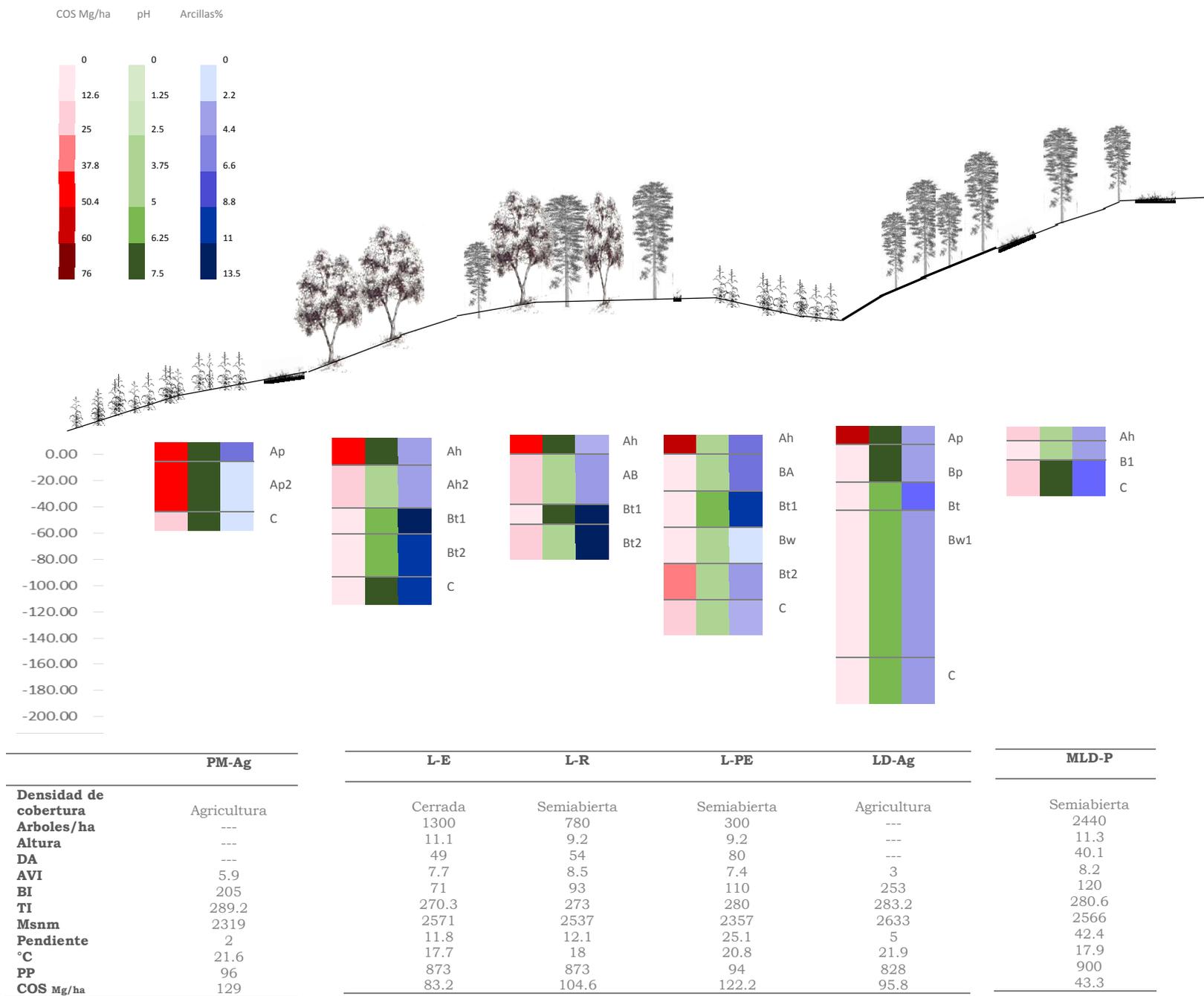
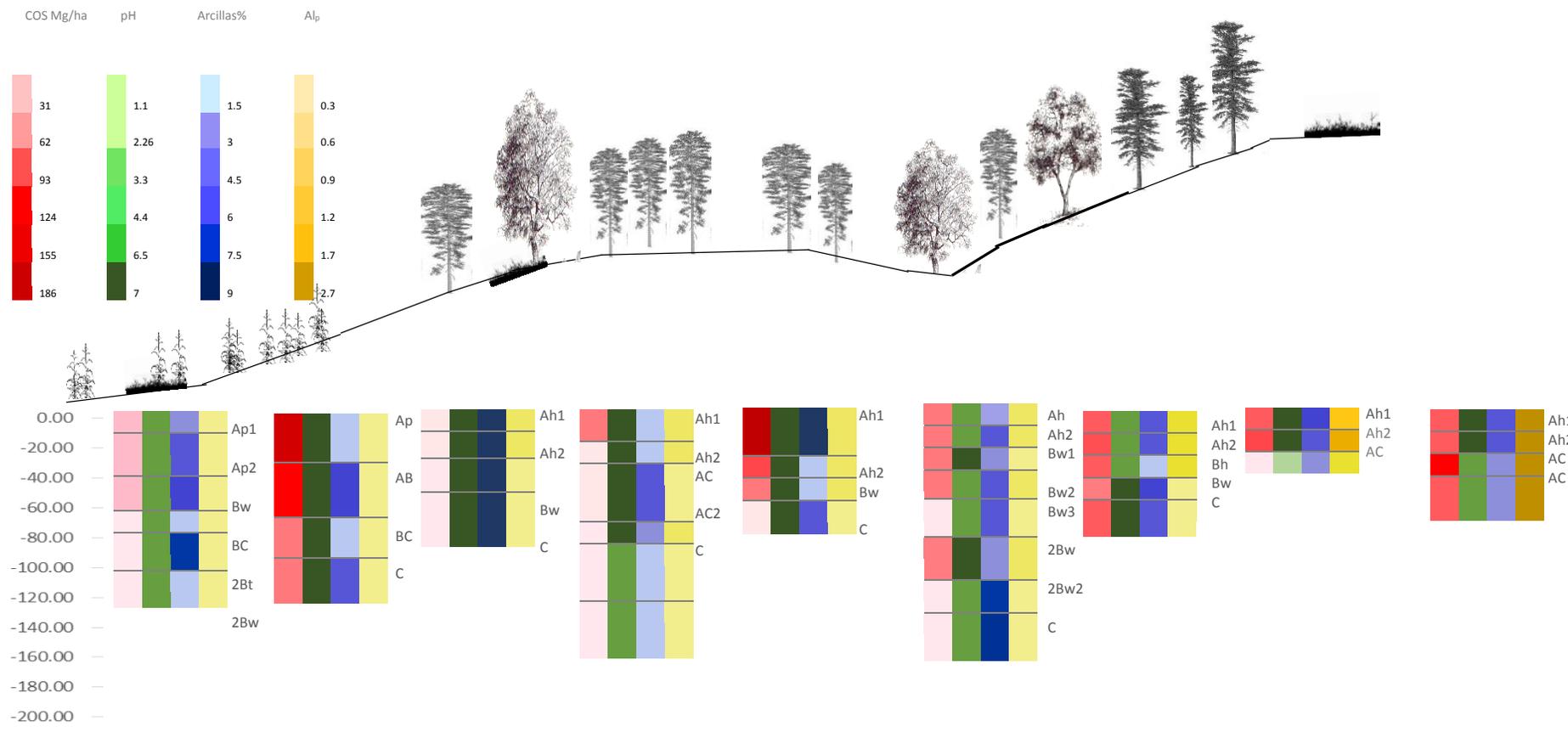


Figura 30. Distribución de los almacenes de carbono en suelos derivados de brecha volcánica



	PA-Ag	PMA-Ag	LDA-P	LLDA-PR	LLDA-P	MLDA-P	MDA-PR	MDA-OE	MDA-O
Densidad cobertura Arboles/ha	Agricultura	Agricultura	Semicerrada	Semiabierta	Semiabierta	Cerrada	Cerrada	Semicerrada	Cerrada
DA	---	---	1150	1040	830	460	550	310	850
AVI	6.8	5.9	6.6	7.6	8.9	6.5	7.78	16.24	8.38
BI	196	205	26.4	46.7	85.3	42.7	70.1	117.8	91.4
TI	294	289.2	5.3	7.3	7.6	7.4	7.6	6.9	7.2
Msnm	2320	2681	66	82	66	98	84	86	85
Pendiente °C	2	13.4	267.5	238.2	238.2	275.9	263.3	255.7	250.3
PP	21.6	15.7	2656	2662	2861	2473	2945	3165	3323
COS Mg/ha	231	314.8	32.7	13.6	13	24.2	24.2	37.7	15.8
			16.1	15.5	13.4	16.9	13.2	10.9	7.8
			815	819	785	896	850	800	720
			44.1	85.3	322.3	318.4	321.9	186.2	330.4

Figura 31. Distribución de los almacenes de carbono en suelos derivados de andesita

Para la unidad de Lomerío ligeramente disectado se desarrollaron suelos bajo el mismo material parental andesítico, para el sitio LLDA-P se presentó un almacén de carbono de 322.3 Mg/ha mientras que en LLDA-PR fue de 85.3 Mg/ha, esta diferenciación se debe a que es un bosque más maduro el sitio LLDA-P, con diámetros del arbolado son de casi el doble comparados con el sitio LLDA-PR, además de la asociación con el roble afecta la acumulación de la hojarasca pues los sitios con roble presentan mayores tasa de mineralización (Kara *et al.*, 2008). El contenido de carbono en los bosque de pino-encino se puede comparar con los resultados de Pérez (2009) quien reporta un rango de 383.9-102.3 Mg/ha, mientras que Aviña (2007) estima a 30 cm 152.7 Mg/ha.

En la unidad geomorfológica de Lomerío se presentaron almacenes de carbono similares que abarcaron para el sitio con mayor carbono acumulado L-PE 122.2 Mg/ha, en el perfil L-R 104.6 Mg/ha y L-E 83.2 Mg/ ha. Son sitios con condiciones de precipitación y temperatura semejantes, la pendiente y desarrollo del perfil lo que indica que el factor determinante es la cobertura vegetal a pesar de que en los sitios L-PE y L-R se encuentran bajo densidad de arbolado semiabierto los arboles con mayor diámetro están L-PE, además que en el sitio L-E y L-R se presenta una alta densidad de arbolado pero con asociación de especies indicadoras de ambientes perturbados como el trompillo (*Ternstroemia pringlei*), especie cuyo establecimiento es favorecido por la apertura del dosel (Merino & Hernández, 2004).

El contenido de arcilla contribuyó en el aumento de carbono orgánico en horizontes más profundos como en el caso del perfil L-E en el horizonte Bt2 con 10.34 Mg/ha, para el L-R en su horizonte Bt2 con 27.8 Mg/ha. Internacionalmente se reporta para Luvisol a 30 cm de profundidad una capacidad de almacenar de 38-88 Mg/ha.

Almacén de carbono en suelos en Piedemonte

La unidad de piedemonte se caracterizó por presentar regiones agrícolas y áreas abandonadas, con un alto contenido de carbono para el caso de PMA-Ag 314.8 Mg/ ha mientras que en el perfil PM-Ag fue de 129 Mg/ha, esta diferencia se presenta porque en el primer sitio se trata de un lugar en reposo; además de esto, los procesos de remoción en masa pueden estar contribuyendo a una mayor acumulación de carbono proveniente de la región de montaña con alta pendiente.

Tabla 16. Carbono almacenado por horizonte en los muestreos en piedemonte y plancie aluvial

PMA-Ag	COS Mg/ha	PM-Ag	COS Mg/ha	PA-Ag	COS Mg/ha
Ap	139.37	Ap	54.01	Ap1	57.87
AB	100.84	Ap2	57.22	Ap2	57.79
BC	39.25	C	17.79	Bw	36.60
C	35.37			BC	28.51
				2Bt	27.05
				2Bw2	21.05

Almacén de carbono en suelos en Planicie aluvial

En la planicie aluvial también se presentó un almacén de carbono alto con 231 Mg/ha al encontrarse bajo reposo; esto se debe a que una baja pendiente lo que permitió un mayor desarrollo del perfil hasta 117 cm, además de la influencia de materiales como la ceniza volcánica en donde el Al forma un papel crucial en la estabilización de la materia orgánica y el aporte de materia orgánica por medio de riego, lo que podría atribuirse a la incorporación de materiales orgánicos fácilmente biodegradables junto con la aguas de riego, los cuales estimulan la actividad microbiana autóctona del suelo, o a la incorporación de microorganismos exógenos (Perucci, 1992).

5.2 Kriging ordinario para la estimación de reservorios de carbono

El método de kriging es un método de interpolación espacial, el cual usualmente es representado por un variograma, en donde se obtiene una sola representación del fenómeno a modelar mediante la estimación del valor esperado cuya varianza es mínima. Para ello, se resuelve un conjunto de ecuaciones utilizando la información presente en el variograma, las distancias relativas entre los datos y la posición del punto donde se desea realizar la estimación. El variograma teórico o del modelo, se genera mediante ajuste estadístico y se utiliza para calcular los pesos que se usarán el proceso de krigeado. Para cualquier análisis geoestadístico profundo sobre el comportamiento de una propiedad se requiere de una serie de etapas (Díaz, 2002).

Análisis exploratorio de los datos, se refiere a una serie de estadísticas básicas, con el propósito de obtener información desconocida *a priori* de la muestra bajo estudio, esta etapa resulta imprescindible para realizar “correctamente” cualquier análisis estadístico y en particular un análisis geoestadístico (Díaz, 2002). Esta parte es esencial para el análisis geoestadístico, para la correcta modelación de una función de variograma, la cual refleje correlación espacial entre los datos. Para este trabajo se evaluaron aspectos como la distribución de los datos con el coeficiente de asimetría, dispersión, varianza, tenencia, datos atípicos.

Análisis variográfico, el semivariograma, conocido también como variograma la cual es la herramienta central de la geoestadística y es estimada más comúnmente por

$$\gamma^*(\underline{h}) = \frac{1}{2N(\underline{h})} \sum_{i=1}^{N(\underline{h})} [Z(\underline{x}_i + \underline{h}) - Z(\underline{x}_i)]^2$$

Donde $N(\underline{h})$ es el número de pares $Z(\underline{x}_i)$ y $Z(\underline{x}_i + \underline{h})$ separados a una distancia

$$h = |\underline{h}|$$

Por definición, el variograma intersecta el origen, esto es $2g(0)=0$. Sin embargo, frecuentemente el variograma presenta una discontinuidad en el origen, una característica denominada efecto pepita o nugget efecto, Journel & Huijbregts (1978).

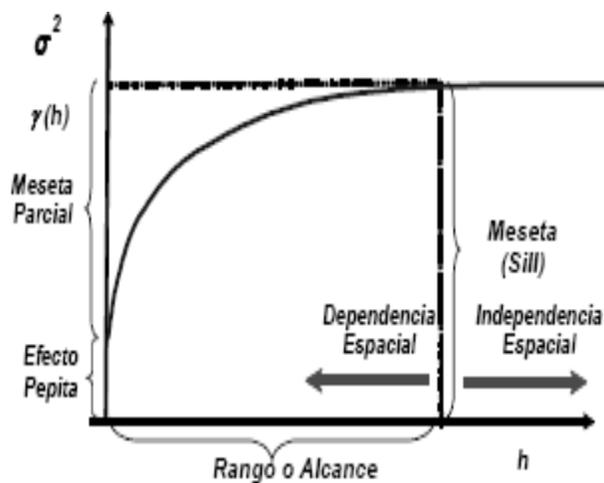


Figura 32. Principales elementos del variograma (Mejía, 2006)

Otro de los componentes del variograma es la meseta o sill la cual se presenta cuando el variograma deja de crecer y alcanza un valor constante, a cierta distancia. Este valor es la varianza *a priori* de la función

aleatoria. En estos casos, la covarianza existe, y el proceso es estacionario de segundo orden.

A medida que la separación dado un valor h entre los puntos aumenta, la correlación entre estos puntos decrecerá. A un cierto valor de h la correlación se hace prácticamente nula, y más allá de este valor se puede decir que los puntos no están correlacionados este punto se denomina el rango.

Predicciones de la distribución mediante estimaciones y/o simulaciones una vez validados los modelos ajustados, se realiza su estimación espacial y se obtienen los mapas y el error estandarizado o desviación estándar.

5.2.1 Análisis exploratorio de datos para carbono orgánico en el suelo

Los datos que se emplearon para llevar a cabo la estimación espacial del carbono en la microcuenca del río La Plancha se complementaron con otros datos publicados por Serrato (en prensa), de los cuales se emplearon 7 puntos de observación, Velázquez (2012) se usaron 3 puntos, 1 punto del Inventario Nacional Forestal y de Suelos 2004-2006 y 6 puntos tomados a partir de la Harmonized World Soil Database Viewer 1.2. Para realizar el análisis exploratorio de datos y del variograma se utilizó el programa RStudio utilizando el script desarrollado por el grupo de modelación estocástica espacial Instituto de Geofísica, UNAM.

Análisis estadístico

Al realizar la estadística básica de los resultados de carbono orgánico en el suelo mostraron tener una media de 246.9 Mg/ha y desviación estándar de 181; sin embargo los datos mostraron asimetría y se identificaron dos puntos outliers con los valores de 763 y 693 Mg/ha.

		Estadígrafos	Valores
Muestras	n		33.0000
Mínimos	Mínimo		41.6460
cuantiles1	1er. Cuartil		104.6900
Medianas	Mediana		199.0000
Medias	Media		246.9978
cuantiles3	3er. Cuartil		322.3400
Máximos	Máximo		763.6000
Rangos	Rango		721.9540
rangosInt	Rango intercuartil		217.6500
Varianzas	Varianza		33029.8240
Desvs	Desviación estándar		181.7411
CVs	Coefficiente de variación		0.7358
Simetrías	Coefficiente de asimetría		1.1277
Curtosiss	Curtosis		3.9170

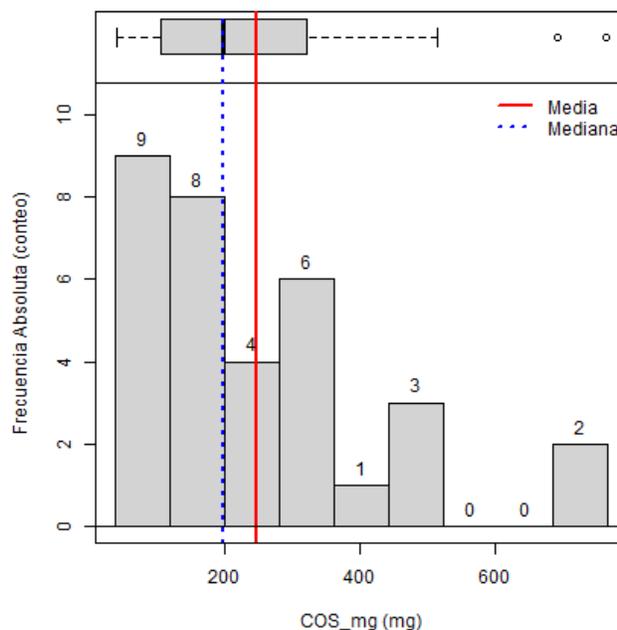


Figura 33. Estadígrafos de la variable COS, histograma y gráfica de caja

Para aumentar la simetría, se quitaron estos dos puntos y se realizó el nuevo cálculo de los estadígrafos para este conjunto de datos; como se puede observar en la Figura 34 el coeficiente de asimetría mejora a 0.5 sin embargo sigue siendo alto.

	Estadígrafos	Valores
Muestras	n	31.0000
minimos	Mínimo	41.6460
cuantiles1	1er. Cuartil	100.2650
medianas	Mediana	193.9000
medias	Media	215.9396
cuantiles3	3er. Cuartil	320.1900
maximos	Máximo	515.3370
rangos	Rango	473.6910
rangosInt	Rango intercuartil	219.9250
varianzas	Varianza	18702.5699
desvs	Desviación estándar	136.7573
CVs	Coefficiente de variación	0.6333
simetrias	Coefficiente de asimetría	0.5275
curtosiss	Curtosis	2.3053

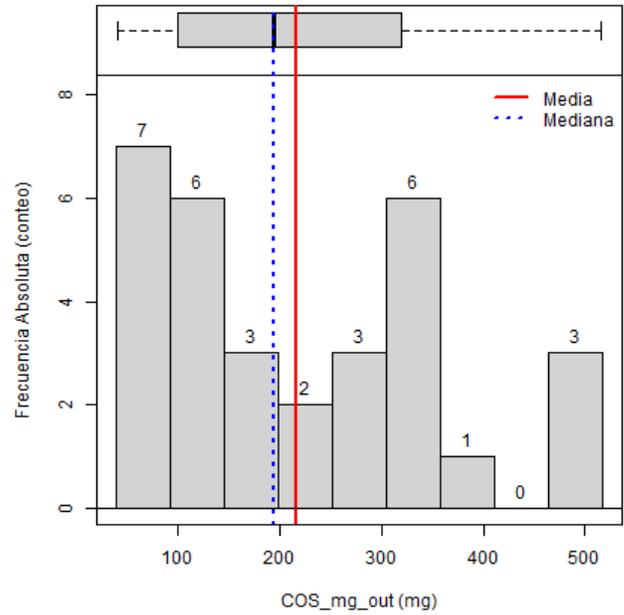


Figura 34. Estadígrafos de la variable COS sin datos outliers, histograma y gráfica de caja

Los siguientes análisis consistieron en llevar a cabo una transformación de los datos con raíz cuadrada y transformación logarítmica; para ambos casos disminuye el coeficiente de asimetría y no se presentaron outliers al realizarse estas transformaciones.

Estadígrafos COS_mg_sqrt_sta		Valores
muestras	n	33.0000
minimos	Mínimo	6.4534
cuantiles1	1er. Cuartil	10.2318
medianas	Mediana	14.1067
medias	Media	14.7048
cuantiles3	3er. Cuartil	17.9538
maximos	Máximo	27.6333
rangos	Rango	21.1799
rangosInt	Rango intercuartil	7.7220
varianzas	Varianza	31.7272
desvs	Desviación estándar	5.6327
CVs	Coficiente de variación	0.3831
simetrias	Coficiente de asimetría	0.3971
curtosiss	Curtosis	2.5141

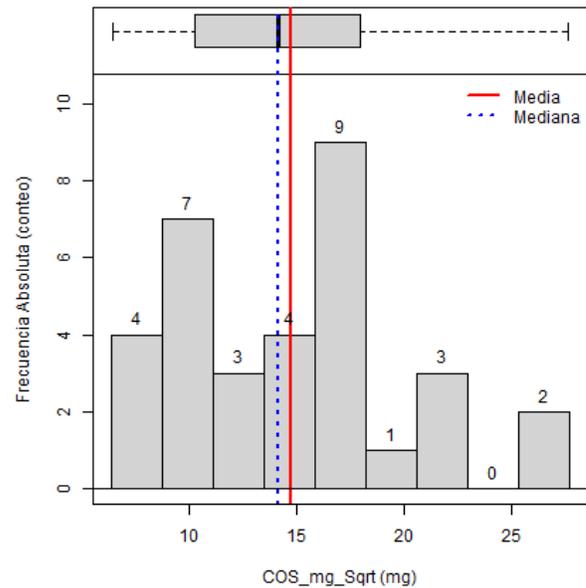


Figura 35. Estadígrafos de la variable COS con transformación raíz cuadrada, histograma y gráfica de caja

Estadígrafos COS_mg_Log1_Stat		Valores
muestras	n	33.0000
minimos	Mínimo	3.7292
cuantiles1	1er. Cuartil	4.6510
medianas	Mediana	5.2933
medias	Media	5.2243
cuantiles3	3er. Cuartil	5.7756
maximos	Máximo	6.6380
rangos	Rango	2.9088
rangosInt	Rango intercuartil	1.1246
varianzas	Varianza	0.6609
desvs	Desviación estándar	0.8129
CVs	Coficiente de variación	0.1556
simetrias	Coficiente de asimetría	-0.3222
curtosiss	Curtosis	2.265

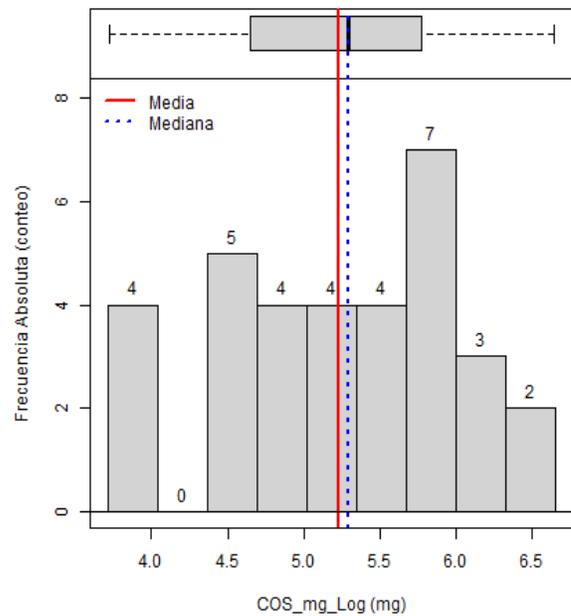


Figura 36. Estadígrafos de la variable COS con transformación logarítmica, histograma y gráfica de caja

Dados estos resultados se toma la decisión de trabajar con los datos con transformación logarítmica ya que presentaron menor coeficiente de asimetría -0.32 y no se obtuvieron datos outliers por lo que se emplearon todos los datos para el variograma.

5.2.2 Análisis variográfico

Una vez que se llevó a cabo el análisis exploratorio de los datos, el siguiente paso es la estimación de la función que describa la correlación espacial del contenido de carbono en el suelo por medio de un variograma.

Análisis de tenencia de los datos

Para realizar el análisis de tenencia de los datos se proyectaron los valores de la variable COS contra las ordenadas y las abscisas respectivamente, lo que nos permite ver si existe una tenencia direccional. Las gráficas resultantes indican que no existe una tenencia preferencial (Figura 37).

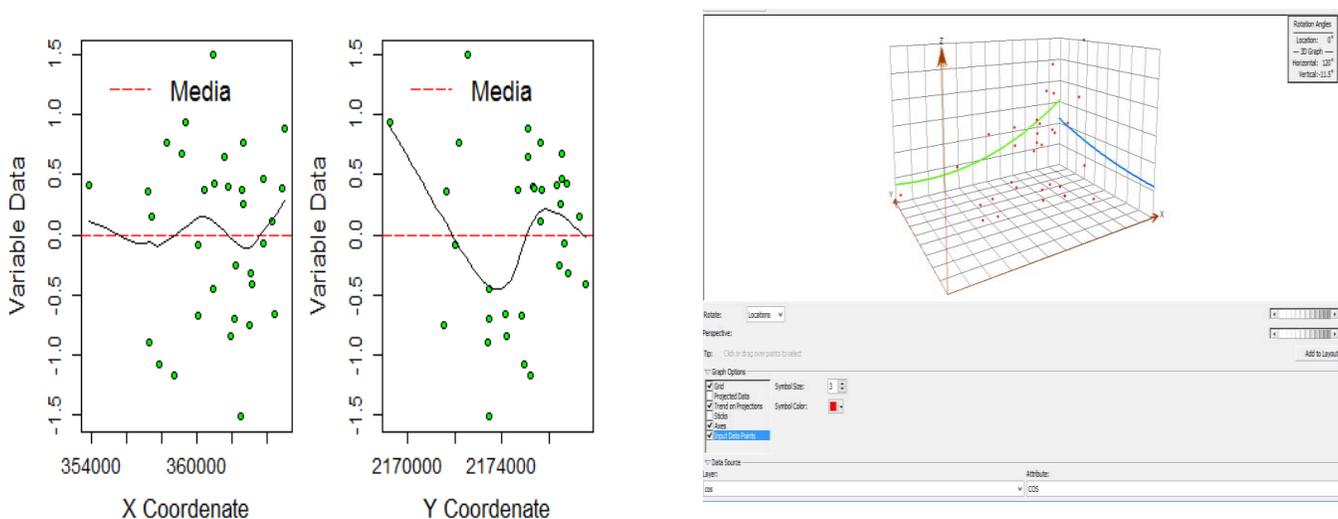


Figura 37. Evaluación de tenencia en los datos de COS

Variograma experimental

El variograma experimental también conocido como adireccional se obtiene tomando la dirección 0° y una ventana de 90°; el número de intervalos o lags fue 10, la distancia máxima fue de 5313.19 m y la distancia mínima fue de 276.6 m.

	Npares	Lags	Semivarianzas
1	6	279.6399	0.1764221
2	22	838.9196	0.3445325
3	43	1398.1993	0.4086712
4	46	1957.4790	0.6482836
5	52	2516.7588	0.4439805
6	62	3076.0385	0.4941949
7	52	3635.3182	0.6159786
8	49	4194.5979	0.4463928
9	42	4753.8777	0.5690082
10	31	5313.1574	0.3668054

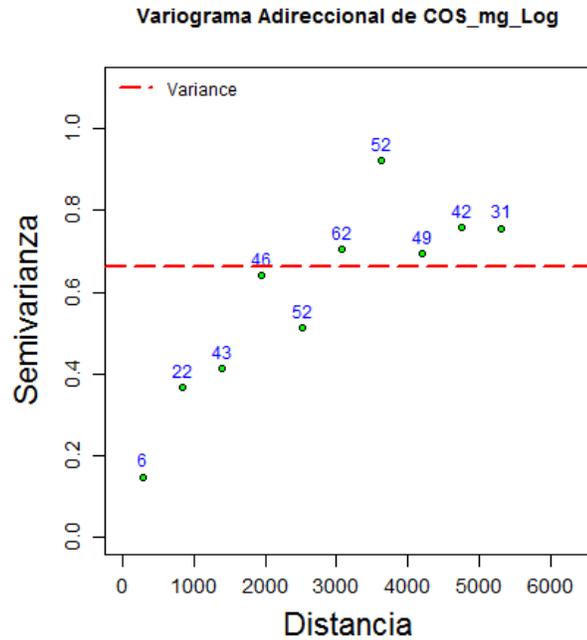


Figura 38. Parámetros del variograma experimental

El mayor número de pares fue 62 y el menor 6; como es de esperarse la cantidad de pares formados disminuye en cuanto aumenta el valor del lag.

Análisis de anisotropía

El modelo variográfico tratado anteriormente se definió para el caso isotrópico; para realizar el análisis de anisotropía geométrica, se estimaron los variogramas direccionales en las direcciones 0°, 45°, 90° y 135° con una tolerancia de 22.5° en cada dirección, los demás parámetros corresponden al variograma experimental.

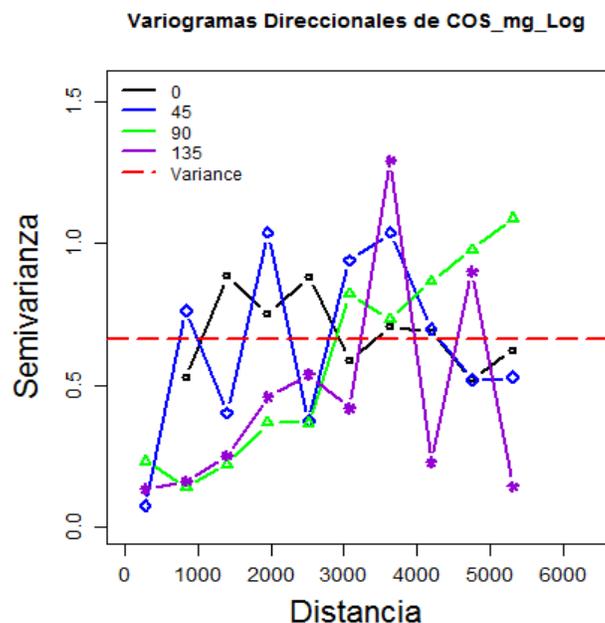


Figura 39. Análisis de anisotropía en COS

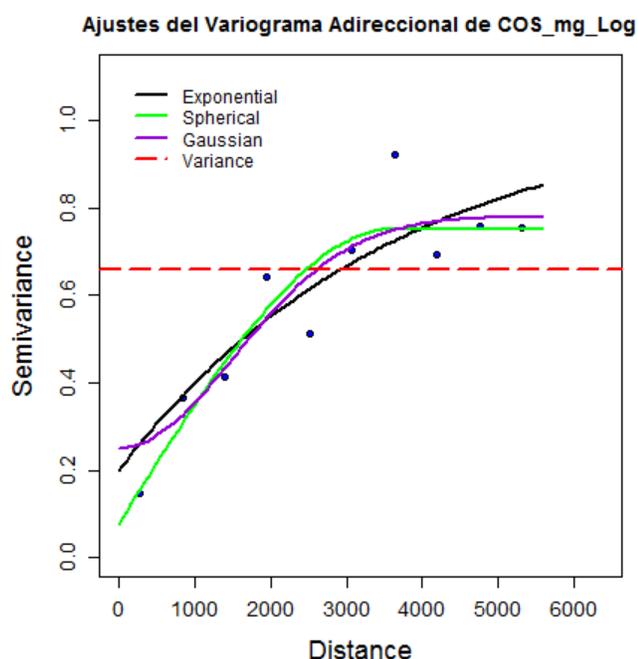
Este análisis permite identificar la posible existencia de anisotropía geométrica cuando los alcances o rangos de los variogramas son significativamente diferentes (Diaz, 2002). Para este caso no se encontró evidencia que indique anisotropía por lo que se propone un caso isotrópico.

Ajuste automático del variograma

Una vez obtenidos los variogramas experimentales, se llevó a cabo la modelación del variograma para la variable COS.

El ajuste de modelos puede llevarse a cabo de una forma visual; sin embargo, esta técnica no es tan fiable y es preferible usar un método estadístico para estos fines; con frecuencia es usado la aproximación por mínimos cuadrados (Díaz, 2002).

A continuación se muestran los parámetros obtenidos y variogramas al ajustar tres modelos exponencial, esférico y gaussiano (Figura 40).

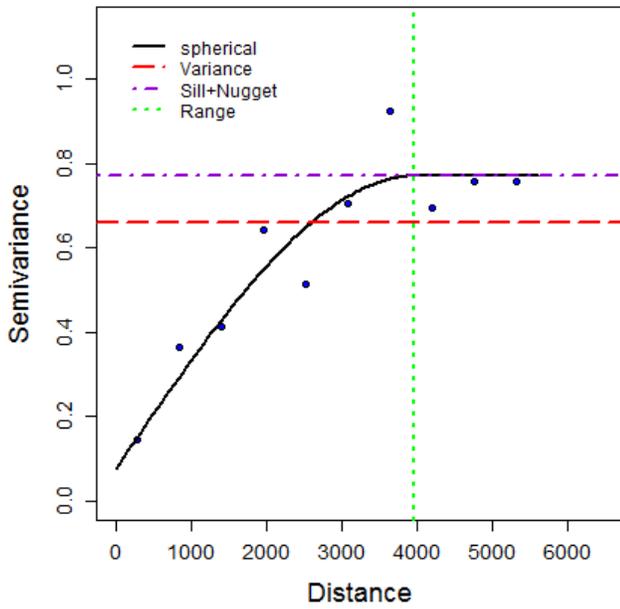


	Nugget	Meseta+Nugget	Alcance	SCE
exponential	0.19845516	1.0322573	3635.000	0.08976691
spherical	0.07650913	0.7524012	3635.000	0.06652243
gaussian	0.25087666	0.7810252	2151.887	0.31440941

Figura 40. Ajuste del variograma a modelo exponencial, esférico y gaussiano

De esta forma se obtiene que el mejor modelo es el tipo esférico con un error de 0.06, Nugget igual a 0.07, alcance en 3963 m y meseta igual a 0.693.

Mejor Ajuste del Variograma Adireccional de COS_mg_Log

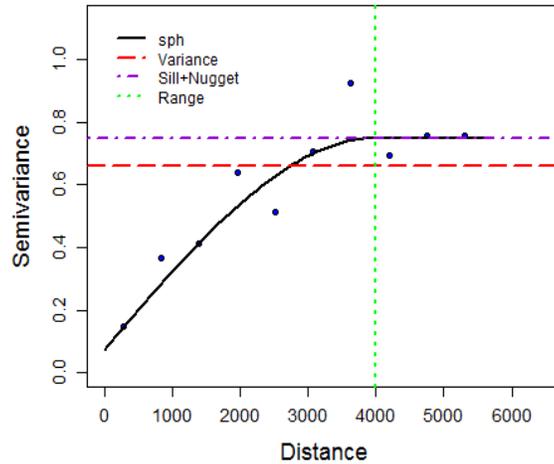


	Nugget	Meseta+Nugget	Alcance	SCE	MaxY	MinY
spherical	0.07650913	0.7699629	3968.076	0.06440864	0.9229283	0.1472599

Figura 41. Ajuste automático del mejor modelo esférico

Con base en este modelo se realizó un ajuste visual, para mejorar los modelos basándose en el criterio de Akaike; a continuación se muestran sus variogramas con los parámetros correspondientes.

Ajuste Manual del Variograma Adireccional de COS_mg_Log



Model	Nugget	Sill+Nugget	Range	MSE
sph	0.0750	0.7500	4000.0000	0.0682

Figura 42. Ajuste visual del variograma a modelo esférico

Validación cruzada de los modelos

El variograma refleja la estructura espacial de los datos, lo que significa que las diferencias al comparar el valor estimado deben ser pequeñas; a continuación se muestran los estadígrafos para el modelo automático y el visual.

Tabla 8. Validación cruzada de los modelos automático y visual

	Z	Z*	Z-Z*
No_muestras	33.00000	33.00000	33.00000
Minimo	3.72921	4.16344	-1.04844
Cuartil_1er	4.65100	4.84579	-0.54046
Mediana	5.29330	5.19162	-0.00746
Media	5.22429	5.22874	-0.00445
Cuartil_3er	5.77561	5.66512	0.46036
Maximo	6.63804	6.15388	1.94819
Rango	2.90884	1.99044	2.99663
Rango_Intercuartil	1.12460	0.81933	1.00082
Varianza	0.66087	0.27219	0.42663
Desv_Estandar	0.81294	0.52172	0.65317
Simetria	-0.32217	-0.16795	0.72178
Curtosis	2.26594	1.96082	3.54802

	Z	Z*	Z-Z*
No_muestras	33.00000	33.00000	33.00000
Minimo	3.72921	3.98138	-1.22618
Cuartil_1er	4.65100	4.88031	-0.57799
Mediana	5.29330	5.24059	-0.13962
Media	5.22429	5.25461	-0.03032
Cuartil_3er	5.77561	5.68879	0.33601
Maximo	6.63804	6.28604	2.01304
Rango	2.90884	2.30466	3.23922
Rango_Intercuartil	1.12460	0.80849	0.91400
Varianza	0.66087	0.33201	0.44469
Desv_Estandar	0.81294	0.57620	0.66685
Simetria	-0.32217	-0.25142	0.77036
Curtosis	2.26594	2.28446	3.91830

El modelo se considera teóricamente válido si el comportamiento del distribución del error es aproximadamente normal con media próxima a cero; en este caso, al comparar las simetrías, el caso de mejor ajuste fue el que obtuvo menos coeficiente de simetría mientras que el ajuste manual fue ligeramente mayor; para el caso de las medias fue el modelo automático el que tiene una menor media con -0.004 mientras que el de ajuste manual es de -0.030.

5.2.3 Estimación espacial y mapeo del modelo

La estimación espacial y mapeo de los modelos es la fase final del análisis geoestadístico; una vez validados los modelos ajustados, se obtiene a continuación el mapa de estimación y del error estandarizado.

Este proceso se lleva a cabo en el software ArcGis 10.2 empleando la herramienta de Geostatistical analyst, aplicando los parámetros de los variogramas ajustado y validado con la técnica de kriging ordinario.

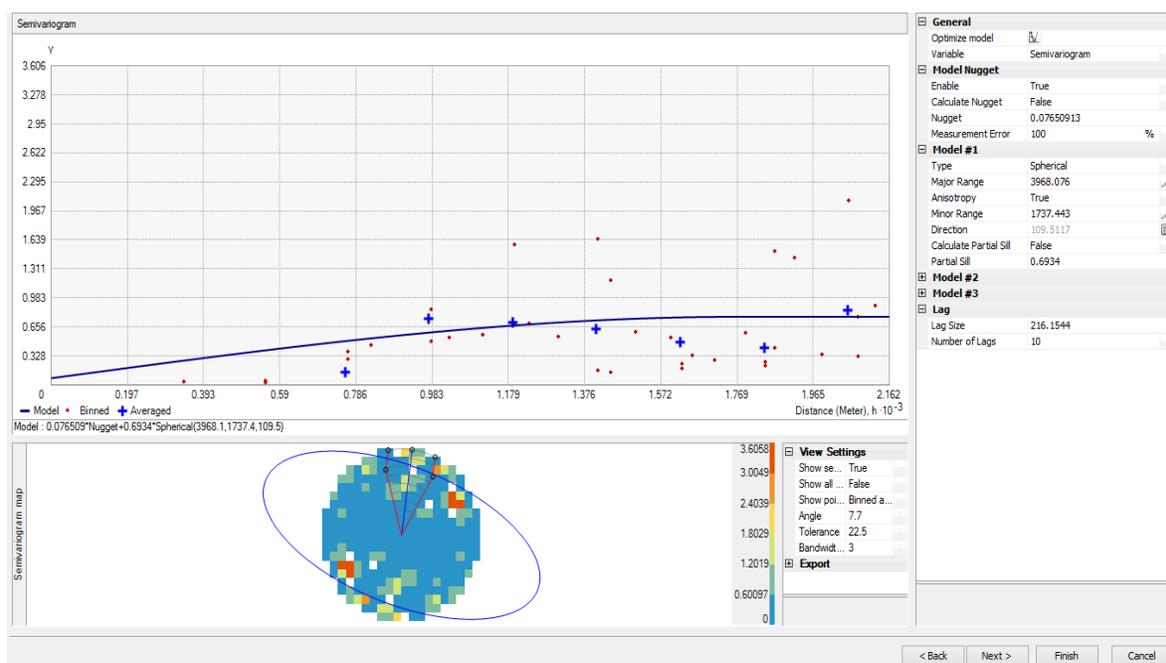


Figura 43 . Parámetros de los variogramas para la estimación de COS en ArcGis 10.2

A continuación se muestran los mapas de carbono orgánico del suelo estimado mediante el variograma y el error estándar del mapa de carbono del suelo.

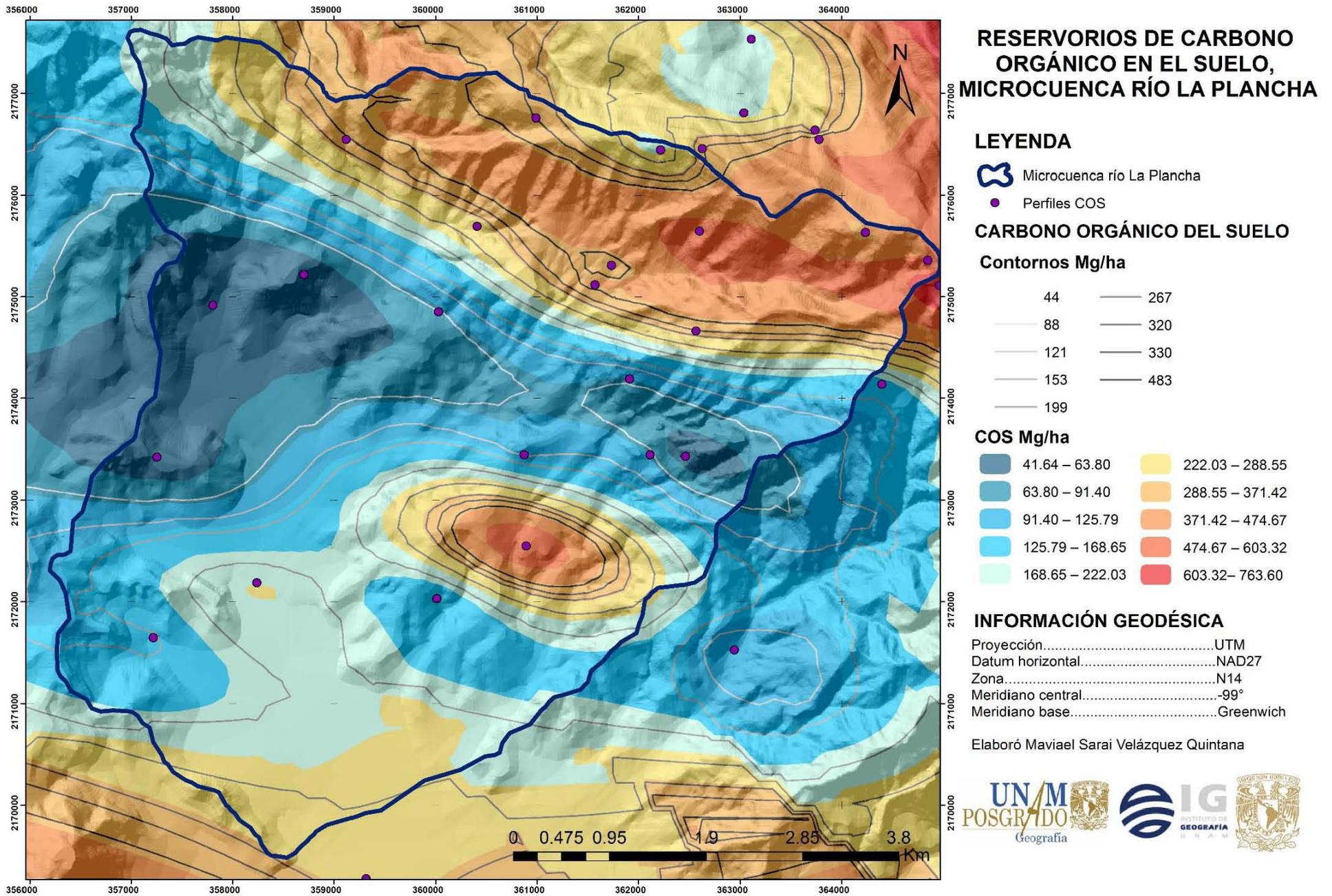


Figura 44. Mapa estimación de la distribución de carbono orgánico del suelo

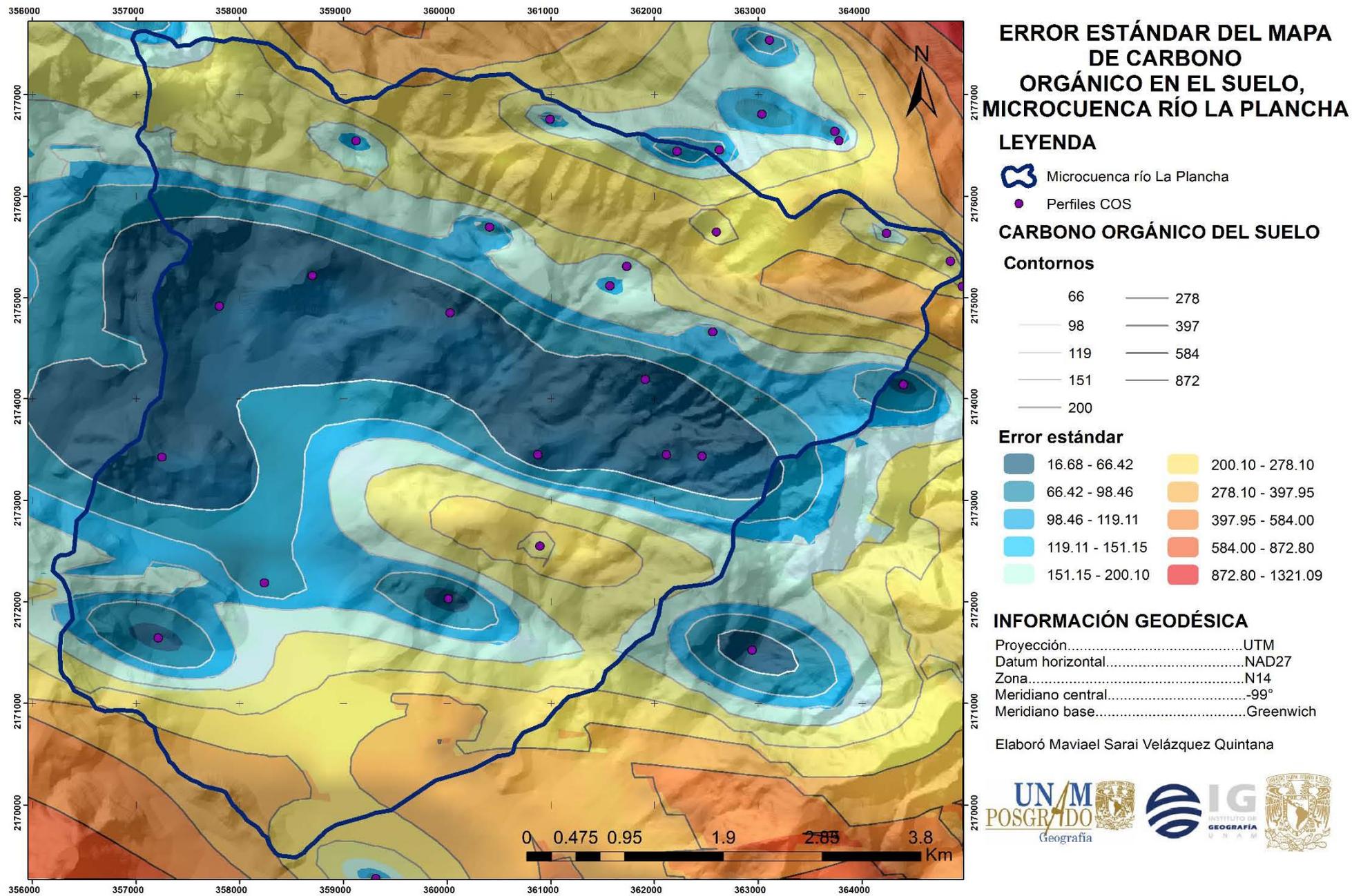


Figura 45. Error estándar del mapa los almacenes de carbono en suelos

El mapa de la estimación de carbono concuerda con las áreas analizadas en este trabajo, encontrándose aquellas regiones con mayor contenido de carbono en la región alta de la cuenca en la zona de montaña disectada y montaña ligeramente disectada, después una superficie de transición, mientras en la parte central una baja de estos almacenes caracterizados anteriormente como regiones de lomeríos y un incremento nuevamente en la parte baja de la cuenca principalmente en la región de planicie aluvial.

De esta manera, se genera un primer acercamiento a la predicción de la distribución de carbono orgánico del suelo dentro de la región de Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, el cual puede robustecerse con información futura para evaluar su potencial o, como se hizo en este trabajo, evaluando otras variables ambientales relacionadas con la capacidad de los suelos como almacén de carbono.

Capítulo VI DISCUSIÓN

La Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca ha enfrentado problemáticas ambientales desde 1986 con el segundo decreto y se agudizaron con el decreto del año 2000, con la ampliación de la Reserva. Estas afectaciones involucran la deforestación y degradación de sus bosques. Para el caso de la cuenca del Rio La Plancha, estos procesos pueden describirse bajo diferentes escenarios espacio-temporales destacándose el año de 1994, ya que presentó un incremento de las regiones deforestadas (211.47 ha) y disminución de bosque cerrado, ya que en el 2004 se da un aumento de la cobertura semiabierta que resulta de las áreas en proceso de recuperación hasta 2015.

En cuanto a la distribución espacial de la degradación forestal y la recuperación del bosque en los cuatro municipios que están dentro de la cuenca, es el municipio de Angangueo en donde para 1994 se presenta la mayor superficie deforestada la cual disminuye para el 2015 en contraste del municipio Senguio, el cual presentó la mayor superficie con cobertura cerrada en 1994 manteniéndose casi constante hasta 2015; de esta manera, se destaca la participación desigual de la población frente al desafío para conservar el hábitat por excelencia de la mariposa monarca.

Dadas sus características ambientales, la cuenca alberga año tras año el fenómeno migratorio de mariposa monarca; sin embargo, al verse degradado y deforestado, la presión sobre la supervivencia de las monarcas también lo está, ya que al comparar los años de 1984 y 2015 se obtiene que aquellas regiones donde se reportaron históricamente colonias de mariposa ahora son zonas perturbadas.

De esta manera, se destaca la importancia de tener información a detalle sobre la configuración histórica del paisaje; para complementar esta información se emplearon variables biofísicas como los índices de vegetación, suelo desnudo, índice de sombra e índice térmico, los cuales resultaron ser herramientas útiles y a pesar de ser empleados en trabajos desarrollados principalmente en Asia, se lograron reconocer patrones de respuesta para las diferentes densidades de cobertura arbórea, permitiendo hacer una caracterización y generar más detalle sobre las condiciones del bosque, considerando al bosque no como un continuo de masa arbórea, sino como un bosque con cierto arreglo entre continuidad y fragmentación, resultado directo del propio sistema natural y el ensamble de las costumbres y necesidades de la población dentro de la cuenca.

Así se destaca el papel crucial de la evaluación del estado de los bosques para incluirse en la valoración del carbono orgánico en los suelos, sobre todo en horizontes superficiales o suelos con poco desarrollo.

Para llevar a cabo la evaluación del suelo como reservorio de carbono en la cuenca se partió de información cartográfica de INEGI de suelos; sin embargo, la resolución del trabajo llevó a generar un mapa geomorfológico en donde se destaca el uso de modelos de paisaje, el cual ha mostrado que los elementos del paisaje son predecibles y que, especialmente el componente geomorfológico, controla una amplia parte de la variabilidad espacial no-aleatoria en la cubierta pedológica (Arnold & Schargel, 1978; Wilding & Drees, 1983; Hall & Olson, 1991); en este sentido se puede explicar la distribución de los reservorios de carbono espacialmente .

Los resultados mostraron un rango amplio de almacén de carbono de 44 Mg/ha a 330 Mg/ha, por lo que el análisis se hizo por unidad geopedológica identificando en la parte alta de la cuenca el mayor contenido de carbono, a pesar de contar con las pendientes más fuertes y poco desarrollo del perfil; esto se debe, por una parte, a la formación de complejos Al-humus, los cuales actuaron como un medio de estabilización de la materia orgánica y donde el pH también fue el adecuado y, por otro lado, la presencia en estos sitios de cobertura densa del bosque, la cual ha contribuido en el desarrollo del perfil aminorando los efectos del viento y la lluvia y así evitando procesos erosivos.

Para la unidad de Lomeríos se encontraron menores pendientes y un mayor desarrollo del perfil; sin embargo, el tipo de suelo que se presentó en general (Luvisol) tuvo valores más bajos de carbono orgánico almacenado, sobre todo en el Lomerío disectado donde se presentó solamente un almacén de 44 Mg/ha. Además de este hecho, en estos sitios se mostró un alto porcentaje de carbono en los horizontes superficiales al comparar a 30 cm los resultados indicaron que a esta profundidad se concentraba un 49-93 % con relación al total del carbono, lo que los convierte en sitios vulnerables ya que la pérdida de estos pocos centímetros estaría comprometiendo la productividad en el ecosistema; aunado a esto, estas zonas, al estar fuera de la zona núcleo las políticas sobre el aprovechamiento del bosque cambian, lo que se ve reflejado en bosques abiertos con frecuencias diamétricas pequeñas, y en algunos casos la presencia de agricultura en altitudes de hasta los 2900 m.

Lo anterior se traduce en un problema ambiental que ya se ha presentado dentro de la cuenca en el 2010 cuando se reportan procesos de remoción en masa los cuales erosionan a su paso, por lo que deben implementar mejores medidas para evitar que se erosionen los suelos dentro de la cuenca, por un lado, se recomienda el control sobre los aprovechamientos forestales sobre todo en las áreas con pendientes pronunciadas y en las zonas agrícolas medidas como el establecimiento de los surcos para sembrar perpendiculares a la pendiente y acolchado con material residual proveniente de las cosechas (Stones & Hilborn, 2000).

En la parte baja de la cuenca se presenta una menor pendiente lo que se relaciona en un mayor desarrollo del perfil; los sitios que se evalúan incluyendo al piedemonte y la llanura aluvial en donde se reportaron valores altos de carbono, precisamente por ser regiones con bajas pendientes y de acumulación, además de estar influenciados por material orgánico proveniente del agua de riego y la estabilización de carbono por medio de Al.

Tomando como base esta información se elaboró un modelo de la estimación de carbono orgánico en el suelo, el cual implicó un análisis más exhaustivo que incluyó un análisis exploratorio de datos y el análisis estructural, los cuales resultaron imprescindibles para la construcción de un variograma que reflejara la correlación espacial que existe entre los datos; se llevó a cabo su validación a través de una validación cruzada, donde el resultado fue un modelo esférico, lo que fue representado en un mapa, el cual mostró concordancia con la delimitación de las unidades geomorfológicas; sin embargo, al valorar el error estándar de este mapa se muestran áreas que tienen un mayor error debido a que no se presentaron datos y son precisamente en aquellas áreas de poco acceso con pendientes muy fuertes en la parte alta de la microcuenca.

A pesar de ello, este mapa puede emplearse para los tomadores de decisiones en la valoración de las áreas “Hot-point” de carbono orgánico en el suelo y ser incorporadas el pago por captura de carbono en la RBMM, ya que, a pesar de estar vigente desde el año 2003, dentro de la ANP no se reporta ningún caso.

Sin embargo, esta incorporación debe estar vinculada con una capacitación y seguimiento dentro de las comunidades ya que en los sitios que fueron evaluados los habitantes no tenían conocimiento sobre la función del suelo como regulador de la calidad del aire y lo relacionaban directamente con la con actitud agrícola. De esta forma, este cambio de paradigma podría traducirse en mejores prácticas y la valoración del recurso suelo dentro de los ecosistemas en la reserva.

CONCLUSIONES

El potencial de captura de carbono orgánico en el suelo en la microcuenca del río La Plancha presentó una amplia variación dependiendo de la unidad geomorfológica, el suelo y la altitud, con una variación entre 44 Mg/ha a 330 Mg/ha, siendo mayor en las partes elevadas con bosque de oyamel y alto contenido de aluminio extractable con pirofosfato y más bajo en bosque de pino y encino en donde el contenido de aluminio es muy escaso y el carbono orgánico de suelo muy bajo.

De esta forma el Aluminio extractable con pirofosfato tuvo una fuerte correlación con la acumulación carbono, debido a que, el intemperismo de los productos piroclásticos, libera el Al^{+3} el cual se asocia al carbono orgánico, formándose complejos organominerales evitando la mineralización de la materia orgánica.

Otro de los factores que influyo para la acumulación de carbono orgánico en el suelo se identificó al realizar el análisis del cambio multitemporal en la cobertura forestal 1971-2015, en donde se localizaron las áreas que fueron alteradas durante este período y donde la acumulación de carbono del suelo fue la menor. Mientras que aquellas zonas donde la cobertura forestal no tuvo cambios los almacenes de carbono fueron los más altos.

Esta diferenciación se apreció en las unidades geomorfológicas; para la montaña disectada se obtuvo la mayor acumulación de carbono orgánico en relación a los lomeríos. En los lomeríos ligeramente disectados se identificó el mayor almacén respecto de aquellos que están disectados. Para los piedemontes la mayor acumulación de carbono orgánico se presentó en el piedemonte de las montañas disectadas comparado con el piedemonte en los lomeríos en parte baja de la cuenca.

Estos factores en conjunto permitieron reconocer los patrones de distribución espacial del carbono orgánico. Además de esto el potencial de carbono orgánico se vio mejorado después de implementado el decreto de ampliación de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, con el pago por servicios ambientales.

Una de las aportaciones de este trabajo es evidenciar el papel crucial del carbono orgánico de los suelos en las prácticas de conservación y como el manejo que la población local implementa en el hábitat de la mariposa monarca y como repercuten en la dinámica del ciclo global de carbono.

REFERENCIAS

- Albertz, J.** 2007. Einführung in die Fernerkundung: Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern. 3rd edition. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, Germany, pp. 254.
- Al-Kaisi M., & Yin X.** 2005. Tillage and crop residue effects on soil carbon dioxide emission in corn-soybean rotations. *Journal of Environmental Quality*, 34: 437-445.
- Alonso-Mejía, A., E. Montesinos-Patino, E. Rendon-Salinas, L.P. Brower & K. Oyama.** 1998. Influence of forest canopy closure on rates of bird predation on overwintering monarch butterflies *Danaus plexippus* L. *Biological Conservation*, 85:151-159.
- Andrews SS., Karlen DL. & Cambardella CA.** 2004. The soil management assessment framework: a quantitative soil quality evaluation method. *Soil Sci Soc Am J* 68:1945-1962
- Arnold, R. & Schargel, R.** 1978. Importance of geographic soil variability at scales of about 1: 25,000. Venezuelan examples In M. Drosdoff, R. B. Daniels & J. J. Nicholaides III (Eds.), *Diversity of soils in the tropics*. ASA Special Publication, 34: 45-66.
- Arrouays D. & Pelissier ,P.** 1994. Modeling carbon storage profiles in temperate forest humic loamy soils of France. *Soil Science*, 157:185-192
- Aviña, L.** 2007. Estimación del contenido de carbon en el suelo de diferentes clases de cobertura vegetal y uso del suelo en la region Perepecha, Michocan, México. Tesis Licenciatura Biología UNAM.
- Bachram, H.** 2007. Fraude y colonialismo el nuevo comercio de los gases de efecto invernadero. En *El clima cambios, peligros y perspectivas*. Autor Pascal J. Editorial Popular, España, pp. 189.
- Baldock, J.** 2007. Composition and cycling of organic carbon. In: Marschner P, Rengel Z (eds) *Soil nutrient cycling in terrestrial ecosystems*. Springer, Berlin/Heidelberg, pp. 1-35
- Bazzaz, F.** 1991. Regeneration of tropical forests: Physiological responses of pioneer and secondary species. In A. Gómez-Pompa, T. C. Whitmore and M. Hadley (Eds.). *Rain forest regeneration and management*, pp. 91- 118. *Man and the Biosphere Series*. Volume 6. UNESCO, Paris, France.
- Bebi, P., Kienast. & W. Schoënenberger.** 2001. Assessing structures in mountain forests as a basis for investigating the forests' dynamics and protective function. *Forest Ecology and Management*, 145:3-14.
- Ben-She A. & Nelson N.** 2004. The complex architecture of oxygenic photosynthesis. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 5:971-982.
- Blaschke, T.** 2004. Object-based contextual image classification built on image segmentation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, pp. 113-119
- Body, J. & Bazhaf.** 2007. What are ecosystem services? The need for standardized environmental accounting units. *Ecological Economics*, 63: 616-626.
- Bolin, B. & R. Sukumar.** 2000. Global Perspective. En Watson, R.T. (eds.). *IPCC Special Report on Land Use, Land-Use Change and Forestry*.
- Bourgeron, P.** 1983. Spatial aspects of vegetation. In: Golly. F. B. (Ed). *Tropical Rain Forest Ecosystem, Structure and function*. Elsevier, Amsterdam, pp. 29 - 48
- Brower, L. & S. B. Malcolm.** 1991. Animal migrations: endangered phenomena. *American Zoologist*, 31:265-276.
- Brown, L., Baylor, O., Williams, E., Slaback, D., Zubieta, R., & Ramirez I.** 2012. Decline of monarch butterflies overwintering in Mexico is the migratory phenomenon at risk?. *Insect Conservation and Diversity*, 5: 95-100.
- Buchdahl, J.** 1999. *Global climatic change: a review*. Manchester: Manchester Metropolitan University
- Budiman, M., Bratney, A., Malone, B & Sulaema, Y.** 2006. Digital mapping of soil. *World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World*. Brisbane, Australia.
- Burke, I., Yonker, C., Parton, W., Cole, C., Flach, K. & Schimel, S.,** 1989. Texture, climate, and cultivation effects on soil organic matter content in U.S. grassland soils. *Soil Science Society of America Journal*, 53:800-805.
- Bustamante, D. & Gallegos, E.** 2009. El mercado de bonos de carbono en México; generalidades y perspectivas de desarrollo. *Universidad Autónoma De San Luis Potosí. Facultad De Economía*, pp. 120.
- Büttner R., Dellino P. & Zinranowski B.** 1999. Identifying magma - water interaction from the surface features of ash particles". *Nature*, Vol., 401, No. 6754, pp. 688-690.
- Calvert, W. H., W. Zuchowski. & L. P. Brower.** 1983. The effect of rain, snow, and freezing temperatures on overwintering monarch butterflies in Mexico. *Biotropica*, 15:42-47
- Caner, L., Hubert, F., Moni, C & Chenu, C.** 2010. Impact of clay mineralogy on stabilisation of organic matter in the clay fraction of a Neo.Luvisol and Cambisol. *World Congress of soil Science*, pp.73-76.
- Cardemil L., Handford M. & Meisel.** 2007. *La célula vegetal. Fisiología Vegetal*. Ediciones Universidad de la Serena, Chile, pp 46
- Cedrún, E.** 2011. *Propiedad Social y Servicios Ambientales en México*. RAN. México.
- Chapin, F., H. A. Mooney, M. Chapin & P. Matson.** 2002. *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*. Springer. Estados Unidos, pp. 456.

- Chen, L. & Yang HCH.** 2008. Scenario simulation and forecast of land use/cover in northern China. *Chines Science Bulletin* 53:1401-1412
- CONAFOR.** 2008. Manual y procedimientos para el remuestreo de campo. Inventario Nacional Forestal y de Suelos, pp. 149.
- CONAFOR.** 2013. Bosques, cambio climático y REDD+ en México. Guía Básica. Jalisco, México, pp. 27-39.
- CONAFOR.** 2013. El Fondo Monarca. Un instrumento innovador de pago por servicios ambientales en apoyo a la conservación de los bosques y a la retribución a comunidades forestales. Jalisco, México, pp. 35.
- CONANP.** 2001. PROGRAMA DE MANEJO DE LA RESERVA DE LA BIOSFERA MARIPOSA MONARCA, pp. 140.
- CONANP.** 2010. Áreas Naturales Protegidas Decretadas. [En línea]. Disponible en: http://www.conanp.gob.mx/que_hacemos/
- CONAPO.** 2007. Índice de marginación a nivel localidad 2005. Consejo Nacional de Población, pp. 257.
- Constanza, R., Arge, R., Groot, R., Faber, S., Grasso, M., Hannon, Bruce., & Limburg, K.** 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387: 253-260.
- Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.** 1992. Nueva York.
- Cruz, F.** 2011. Contenidos de carbono orgánico de suelos someros en pinares y abetales de áreas protegidas de México, pp. 849-863.
- Daily, G.** 1997. *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems.* Island Press, Washington, D.C.
- Demart, Alan.** 1978. Características del Eje Neo volcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación. UNAM, Instituto de Geología. 172-187pp.
- De la Maza, R.** 2007. Una historia de las áreas naturales protegidas en México. México, D.F: Instituto Nacional de Ecología
- Diario Oficial de la Federación.** 2000. SECRETARIA DE MEDIO AMBIENTE, RECURSOS NATURALES Y PESCA. DECRETO por el que se declara área natural protegida, con el carácter de reserva de la biosfera, la region denominada Mariposa Monarca.
- Diario Oficial de la Federación.** 2009. SECRETARIA DE MEDIO AMBIENTE, RECURSOS NATURALES Y PESCA. DECRETO que modifica el Artículo Primero del diverso por el que se declaró como Area Natural Protegida, con la categoría de Reserva de la Biosfera, la región denominada Mariposa Monarca.
- Díaz, M.** 2002. Notas del Curso: Geoestadística aplicada, Instituto de Geofísica, UNAM, Instituto de Astronomía, Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente de Cuba, pp.135.
- Dirzo, R & García MC.** 1991. Rates of deforestation in Los Tuxtlas a neotropical area in southeast Mexico. *Conservation Biology* 6:84-90
- Dkhar, J & Pareek, A.** 2014. What determines a leaf's shape. *EvoDevo*, 5:5-47.
- Eastaway, P.** 2007. Nature photography. In Peres, M.R. (ed.), *Focal encyclopedia of photography.* 4th edition. Elsevier, Amsterdam, pp. 576-577.
- Ellert, B. H., H. H. Janzen. & B.G. McConkey.** 2001. Measuring and comparing soil carbon storage. In: Lal, R., J. M. Kimble, R. F.
- Elliott, E. T., Paustian, K. & Frey, S. D.** 1996. Modeling the measurable or measuring the modelable: A hierarchical approach to isolating meaningful soil organic matter fractionations. Heidelberg, Germany: Springer, pp. 161-179.
- Enquist BJ, & Niklas KJ.** 2002. Global allocation rules for patterns of biomass partitioning across seed plants. *Science*, 89:812-819
- Escobar, A.** 2007. La invención del Tercer Mundo Construcción y deconstrucción del desarrollo. (Cap. 1 y 2, pp. 19-100). Editorial Gobierno Bolivariano de Venezuela, Fundación Editorial el perro y la rana.
- Eswaran, H., Van den Berg. & Reich, O.,** 1993. Organic carbon in soils of the World. *Soil Sci.*, 57:192-194.
- FAO,** 2001. Global forest resource assessment 2000. Main report, FAO Forestry Paper, Rome, pp.140.
- Estes, J y Hemphill, J. 2001. Introduction to photointerpretation and photogrammetry. The International Center for Remote sensing education. Santa Barbara, California.
- FAO.** 2005. Forest Resource Assessment (Serie Internet) (15 resulted clave). <http://www.fao.org>.
- FAO.** 2010. Evaluación de los recursos forestales mundiales. (Informe Principal). Roma: Oficina De Intercambio de Conocimientos, Investigación y Extensión, FAO.
- FAO.** 2012. El estado de los bosques del mundo. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura Roma, pp. 64.
- Feng, Y. & X. Li** 2001. An analytical model of soil organic carbon dynamics based on a simple "hockey stick" function. *Soil Sci*, 166: 431-440
- Fensham RJ. & Fairfax RJ.** 2002. Aerial photography for assessing vegetation change: A review of applications and the relevance of findings for Australian vegetation history. *Australian Journal of Botany*, 50: 415-429.
- Florinsky IV.** 1998. Combined analysis of digital terrain models and remotely sensed data in landscape investigations. *Progress in Physical Geography*, 22:33-60.

Foladori, G & Tommasino, H. 2000. El concepto de desarrollo sustentable treinta años después. *Desarrollo y Medio Ambiente*, 1: 41-56.

Follet, & B. A. Stewart. (eds). *Assessment Methods for Soil Carbon*. CRC Press LLC. Boca Raton Fl, pp. 131-146

Franklin, J., Spies, T., Van Pelt, Carey, A., Thornburgh D, et al. 2002. Disturbances and structural development of natural forest ecosystems with silvicultural implications, using Douglas fir forests as an example. *For. Ecol. Manag.*, 155:399-423.

García, E. & De la Cruz Hernández, J.A. 2005. Caracterización Socioeconómica y ambiental de los predios que participan en el fondo para la conservación de la mariposa monarca. Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF), Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza, A.C., Biocenosis, A.C. 111 pp.

Gausman, W., W. A. Allen. & R. Cardenas. 1969. Reflectance of cotton leaves and their structure. *Remote Sensing of Environment*, 1: 19-22.

Gibbs, H.K., S. Brown, J.O. Niles & J.A. Foley. 2007. Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks: Making REDD a reality. *Environmental Research Letters*.

Global Forest Watch, Sizer, N. 2013. World Resources Institute <http://www.globalforestwatch.org/>

Graf, S. & Bauche, P. 2009. El pago por servicios ambientales como instrumentos de conservación de cuencas. Comisión Nacional Forestal. Diario Oficial de la Federación.

Guo LB, Gifford RM. 2002. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. *Glob Chang Biol* 8:345-360

Goudriaan, J. 1992. ¿A dónde va el gas carbónico?: el papel de la vegetación. *Mundo Científico*, 12: 687-692

Gutiérrez, E. 2005. La noción del desarrollo desde la Ciencias Sociales. En: Karla Valverde y Alejandra Salas-Porras (Coords.) *El desarrollo –diversas perspectivas-México*, Ediciones Gernika, pp. 69-97

Handford M., Rodríguez-Furlán C. & Orellana A. 2006. Nucleotide sugar transporters: structure, function and roles in vivo. *Braz J Med Biol Res*, 39:1149-1158

Hall, G. & Olson, C. 1991. Predicting variability of soils from landscape models. In M. J. Mausbach & L. P. Wilding (Eds.), *Spatial variabilities of soils and landforms*. SSSA Special Publication, 28: 9-24.

Hardin, G. 1968. "The Tragedy of Commons" en *Science*, v. 162 (1968), pp. 1243-1248.

Hay G., Blaschke, Marceau D. & Bouchard A. 2003. A comparison of three image-object methods for the multiscale analysis of landscape structure. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 57: 327-345.

Heisey, A. & Kawano, K. 2001. In the Fifth World: Portrait of the Navajo Nation. Rio Nuevo Publishers, Tucson, Arizona, United States, pp. 88.

Herbert Tommie; Rebeca Vorada; Michael Jenkins, Ricardo Bayon & Juan Frausto. 2010. Fondos Ambientales y Pagos por Servicios. Red Latinoamericana de Fondos Ambientales RedLAC. Brasil, pp. 102.

Hernández, A., Ascanio, M., Morales, M., Bojorquez, J., García, NE & García, D. 2006. Fundamentos de la formación del suelo, cambios globales y su manejo. México: Editorial Universidad Autónoma de Nayarit, pp.15-25.

Hinojosa, A. 2004. Plan de proyecto. Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca. Inter-American Foundation, CONANP, pp.15.

Hilinski, T. 2001. Century 5: Implementation of Exponential Depth Distribution of Organic Carbon in the CENTURY Model. Department of Soil and Crop Sciences, Colorado State University.

Hoen, H. & Solberg, B. 1994. Potential and economic efficiency of carbon sequestration in forest biomass through silvicultural management. *Forest Science*, 40: 429-451.

Hoersch B., Braun G. & Schmidt U. 2002. Relation between landform and vegetation in alpine regions of Wallis, Switzerland: Amultiscale remote sensing and GIS approach. *Computers, Environment and Urban Systems*, 26: 113-139.

Holmén, K. 2000. The Global Carbon Cycle. En Jacobson, M. y colaboradores. *Earth System Science From Biogeochemical Cycles to Global Changes*. Academic Press. Estados Unidos. 527 pp.

Houghton, R. 1996. Converting terrestrial ecosystems from source to sinks of carbon. *Ambio*, 25: 267-272.

Howard, J. 1991. Remote sensing of forest resources, theory and application. London: Campbell & Hall.

Hudson, B. 1992. The soil survey as paradigm-based science. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56, 836-841.

INEGI. 2009. Inventario Nacional Forestal y de Suelos México 2004-2009. Una herramienta que da certeza a la planeación, evaluación y el desarrollo forestal de México. Jalisco, Mexico.

INEGI. 2010. Censos y conteos de población y vivienda. <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/ccpv/presentacion.aspx>

IPCC. 2001: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, J.T., Y. Ding, D.G. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, y C.A. Johnson (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, USA.

IPCC. 2003. Good practice Guidance for land use, land-Use Change and Forestry. National greenhouse Gas Inventories

programme, Institute for Global Environment strategies, Kanagawa, Japón.

IPCC. 2007: Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza.

IPCC. 2013: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

ISRIC – FAO. 2002. Procedures for soil analysis, 6ta Edition, Wageningen, Alemania.

Janzen, H. 2006. The soil carbon dilemma: shall we hoard it or use it? *Soil Biol Biochem*, 38:419–424.

Jastrow, J. & Miller R. 1998. Soil aggregate stabilization and carbon sequestration: feedbacks through organomineral associations. In: Lal R, Kimble JM, Follett RF, Stewart BA (eds) *Soil processes and the carbon cycle*. CRC Press, Boca Raton FL, USA, pp. 207–223

Jarocińska A. & Zagajewski B., 2008. Correlation for terrestrial and aerial remote sensing vegetation indices for the Bystrzanka watershed, Teledetekcja Środowiska 40, Klub Teledetekcji Środowiska Polskiego Towarzystwa Geograficznego, Warsaw 2008.

Jennings, S., Brown, N., & Sheil, D., 1999. Assessing forest canopies and understory illumination: canopy closure, canopy cover and other measures. *Forestry*, 72: 59–74.

Jenny, H. 1941. Factors of soil formation. New York: McGraw-Hill.

Jobbágy, E. & Jackson, R. 2000. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecol Appl*, 10:423–436

Johnston, K., VerHoef J.M., Krivoruchko K. & Lucas N. 2001. Using ArcGis Geostatistical Analyst. ESRI, pp.300

Journel, A. G. y Huijbregts, C. J.. 1978. Mining Geostatistics, Academic Press, New York, pp. 600.

Kageyama, P. Y. 1994. Revegetacao de areas degradadas: Modelos de consociacao con alta diversidade. En: II Simposio internacional sobre recuperacao de áreas de gradadas. Foz de Iguacu. Pp. 559 – 576.

Kara, Ö., Bolat, Ý., Çakýrođlu, K., & Öztürk, M. 2008. Plant canopy effects on litter accumulation and soil microbial biomass in two temperate forests. *Biology and Fertility of Soils*, 45: 193-198.

Kohlmaier, G., Weber, M. & Houghton, R. A. 1998. Carbon dioxide mitigation in forestry and wood industry. Berlin: Springer, 1998.

Korhonen L, KT Korhonen, M Rautiainen. & P Stenberg .2006. Estimation of forest canopy cover: a comparison of field measurement techniques. *Silva Fennica*. 40: 577–588.

Lal R .2004. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 123:1–22

Lal, R. 2005. Forest soil and carbon sequestration. *Forest Ecology and Management*, 220:242-258.

Landres P., Morgan P. & Swanson F. 1999. Overview of the use of natural variability concepts in managing ecological systems. *Ecological Applications*, 9 :1179–1188.

Lee K. , Marcus S., Knox J. 2011. Cell wall biology: perspectives from cell wall imaging. *Mol. Plant*, 4: 212–219

Le Quer’ e, C. 2009. Closing the global budget for CO₂, *Global Change*, 74: 28–31.

Ley general de desarrollo forestal sustentable. 2003. Diario Oficial de la Federación. Cámara de diputados del H. congreso de la Unión

Ley general del equilibrio ecológico y protección al ambiente. 2012. Diario Oficial de la Federación. Cámara de diputados del H. congreso de la Unión.

Leroux , O., Leroux, F., Bagniewska-Zadworna, A., Knox J. P., Claeys M., Bals S., Viane, R. 2011. Ultrastructure and composition of cell wall appositions in the roots of *Asplenium* (Polypodiales). *Micron*, 42 :863–870

Lickacz J & Penny D .2001. Soil organic matter. Alberta Agriculture and Food Agdex 536–1 (Online). [http://www1.agric.gov.ab.ca/\\$department/deptdocs.nsf/all/agdex890?opendocument](http://www1.agric.gov.ab.ca/$department/deptdocs.nsf/all/agdex890?opendocument) .

López, J. 2011. Deforestation and forest degradation in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve, Mexico, 2003–2009. *Journal of Maps*, v2011, pp. 626-633.

Ludwing, J, Eager, G., Bastin, V. Chewings & Liedloff. 2002. A leakiness index for assessing landscape function using remote-sensing. *Landscape Ecology*, 17:157-11.

Luege, J. 2005. Secretaria de medio ambiente y Recursos Naturales.

Lucas, R., Honzak, M., Foody, P & Covers, C. 1993. Characterizing tropical secondary forest using multitemporal Landsat sensor imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 14:3061-3067.

Lugo, H. 1988. Elementos de Geomorfología aplicada. UNAM. 128 pp.

Lugo, H. 2002. La superficie de la Tierra I. Un vistazo a un mundo cambiante. México: FCE, SEP, CONACyT. 150 pp.

Lugo, H. (Ed.). 2011. Diccionario geomorfológico. Cd. México: Universidad Nacional Autónoma de México

- Lugo, S.** 2009. Evaluación de experiencias de conservación comunitaria en dos comunidades del estado de Michoacán. Facultad de Ciencias, Posgrado en Ciencias Biológicas. Universidad Nacional Autónoma de México, pp 142.
- Maguire, D.A., & A. Kanaskie.** 2002. The ratio of live Crown length to sapwood area as a measure of crown sparseness. *For. Sci*, 48:93–100
- Mann, I.** 1986. Changes in soil carbon storage after cultivation. *Soil Science*, 142: 279–288
- Mas J., Sorani V. & Álvarez R.** 1996. Elaboración de un modelo de simulación del proceso de deforestación. *Investigaciones Geográficas*. 5:43-57.
- Mas J., Velásquez A. & Couturier S.** 2009. La evaluación de los cambios de cobertura/uso del suelo en la República Mexicana. *Investigación Ambiental*. 1:23-39.
- Masera, O.** 1995. Estimación de parámetros biológicos e indicadores económicos para proyectos forestales de captura de carbono. Documento de trabajo No. 16. Grupo Interdisciplinario de tecnología Rural Apropriada (GIRA). Michoacán, México.
- Matus, F., Panichini, M., Godoy, R. & Borie, F.,** 2009. Soil carbon storage in allophanic soils: study of a temperate pristine rainforest *Nothofagus pumilio* in the altitudinal limit. In: Verhoest, N., Boeckx, P., Oyarzún, C., Godoy, R. (Eds.), *Proceedings in Ecological Advances on Chilean Temperate Rainforests*. Academic Press, Belgium, pp. 147–169.
- Manzo, L, López, J. & Alcantara, I.** 2014. Role of forest conservation in lessening land degradation in a temperate region: The Monarch Butterfly Biosphere Reserve, Mexico. *Journal of Environmental Management*, 138:55-66
- McBratney A., Mendonça Santos M. & Minasny B.** 2003. On digital soil mapping. *Geoderma*, 117:3–52
- Merino, L.** 2001. Las políticas forestales y de conservación y sus impactos sobre las comunidades forestales. Centro Regional de Investigación Multidisciplinaria de la UNAM, pp.41.
- Merino, L & Hernández, M.** 2004. Destrucción de las instituciones comunitarias y deterioro de los bosques en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, Michoacán, México, *Revista Mexicana de Sociología*, 66 : 261-309.
- Millennium Ecosystem Assessment.** 2005. *Ecosystems and Human Well-being: Biodiversity Synthesis*. Washington, DC: World Resources Institute, pp.82.
- Minasny, B., McBratney ,AB., Malone ,BP. & Wheeler I.** 2013. Digital mapping of soil carbon. *Adv Agron*, 118:1–47
- Montoya, G., L. Soto, B. De Jong, K. Nelson, P. Farias, P. Yakac, J. H. Taylor & R. Tipper** 1995. Desarrollo forestal sustentable: Captura de carbono en las zonas tzeltal y tojolabal del estado de Chiapas. Cuadernos de trabajo No. 4-INE. México.
- Mooney, H & Ehrlich, P.** 1987. Ecosystem services: a fragmentary history. En : G.C Daily (ed.). *nature's Services: Societal Dependence on Natural ecosystems*. Island press, Washington, D.C, pp. 11-22.
- Monroy, P.** 2009. Mercado de bonos de carbono : la simulación. *Voltaire.net*.
- Mooser, F.** 1972. El Eje Neovolcánico; debilidad cortical prepaleozoica reactivada en el terciario: Mazatlan, soc. *Geol.Mexicana Conservacion NaI*, 2:186-188.
- Munasinghe, L., T.-S. Jun. & D.H. Rind.** 2012. [Climate change: A new metric to measure changes in the frequency of extreme temperatures using record data](#). *Climatic Change*, 113: 1001-1024
- Mulroy, T. W.** 1979. Spectral properties of heavily glaucous and non-glaucous leaves of a succulent rosette-plant. *Oecologia*, 38: 349–357.
- Neumann, J.** 1985. Climatic change as a topic in the classical greek and roman literature. *Departament of Atmospheric Sciences* 4:441-454
- Nieder, R & Bendi, D.** 2008. Carbon and nitrogen in the terrestrial environment. Springer Netherlands.
- Omonode, R.A. & T.J. Vyn.** 2006. Vertical distribution of soil organic carbon and nitrogen under warm-season native grasses relative to croplands in west-central Indiana, USA. *Agriculture, Ecosystems and Environment* , 117: 159–170.
- Ordoñez, J. & O. Masera.** 2001. Captura de carbono ante el cambio climático. *Madera y Bosques* 7:3-12.
- Ordóñez, J.** 2002. Emisiones y captura de carbono derivadas de la dinámica de cambio en el uso del suelo en los bosques de la Región Purépecha, Michoacán, México. Documento que para obtener la Candidatura a doctor en Ciencias Biomédicas presenta; Programa Doctoral en Ciencias Biomédicas, Instituto de Ecología, UNAM. México.
- Ordoñez, J.** 2008. Cómo entender el manejo forestal, la captura de carbono y el pago por servicios ambientales. *Ciencias*, 90: 37-Pearson, T. R.H.; Walker, S.; Brown, S. L.(2005). *Sourcebook for Land use, Land-use change and forestry Projects*. BioCarbon Fund. Winrock International. 64 pp.
- Orych, A., Walczykowski, P., Dabrowski, R & Kutyna, E.** 2013. Using plant spectral response curves in detecting plant stress. *Ecological Questions*, 17:67-74.
- Parfitt, R.L.,** 2009. Allophane and imogolite: role in soil biogeochemical processes. *Clay Minerals*. 44: 135–155.
- Pastrana** 2008. en Torres, J. 2008. Adaptación al cambio climático: de los fríos y los calores Andes. Lima Soluciones prácticas. pp. 154.
- Pérez, S.** 2009. Los reservorios de carbono en los bosques de San Juan Xoconusco, Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca. Tesis de Maestría en Geografía. UNAM, pp.100.

- Pérez, C & Shinomi, Y.** 2004. Métodos y estrategias para el desarrollo sustentable del secano. Ministerio de investigaciones agropecuarias centro regional de investigación Quilamapu Chillóan. Chile.
- Peña, V., Vazquez, L & Siebe, C.** 2009. Soil carbon stocks and forestry productivity in volcanic ash soil of different age (1835-30500 years B.P) in Mexico. *Geoderma*, 149:224-234.
- Perucci, P.** 1992. Enzyme activity and microbial biomass in a field soil amended with municipal refuse. *Biol. Fertil. Soils*, 14:54-60.
- Pizarro, C., Escudey, M. & Fabris, J.D.** 2003. Influence of organic matter on the iron oxide mineralogy of volcanic soils. *Hyperfine Interactions*, 148: 53-59.
- Post, W., W. R. Emanuel, P. J. Zinke, & A. G. Stangenberger.** 1982. Soil carbon pools and world life zones. *Nature*, 298:156-159.
- Post, W. & Mann.** 1990. Changes in Soil Organic Carbon and Nitrogen as a result of cultivation, A.F. Bouwman, editor, *Soil and the Greenhouse effect*. New York: John Wiley & sons.
- Post, W & Kwon, C.** 2000. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential. *Global Change Biology*, 6:317-328.
- Prentice, S, Harrison, P & Bartlein J.** 2011. Global vegetation and terrestrial carbon cycle changes after the last ice age. *New phytologist*, 189:988-998.
- Protocolo de Kyoto.** 1998. Naciones Unidas. Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.
- Quesada CA, Phillips OL, Schwarz M, Czimczik CI, Baker TR, et al.** 2012. Basin-wide variations in Amazon forest structure and function are mediated by both soils and climate. *Biogeosciences*, 9:2203-2012
- Rambler, M., Margulis, L & Fester, R.** 1989. *Global Ecology. Towards a Science of the Biosphere*. Academic Press, London, pp. 89.
- Rao, S. M.** 1995. Mechanistic approach to the shear strength behavior of allophonic soils". *Engineering Geology*, 40: 215-221.
- Rendón, E. & Tavera, A.** 2014. Monitoreo de la superficie forestal ocupada por las colonias de hibernación de la Mariposa Monarca en Diciembre de 2013. Michoacán, Zitacuaro: World Wildlife Fund for Nature.
- Richards, P.** 1983. The Three-dimensional Structure of Tropical Rain Forest. In: Sutton, S. et al. (eds.). *Tropical Rain Forest Structure and Management*. Blackwell Scientific. Publishers. Oxford, pp 3- 10.
- Rikimaru, A., S. & Miyatake.** 1997. Development of Forest Canopy Density Mapping and Monitoring Model Using Indices of Vegetation, Bare Soil and Shadow.
- Rikimura, A., Roy, P & Miyatake, S.** 2002. Tropical forest cover density mapping. *Tropical ecology*, 43:39-47.
- Robledo, M. & Contreras, C.** 2009. La geografía ambiental. Orígenes, ámbito de estudio y alcances. En: *Geografía humana y ciencias sociales. Una relación reexaminada*. Zamora: El Colegio de Michoacán, pp. 261-296.
- Rodriguez, A., Arbelo, J., Mora, J., Guerra, J & Armas, C.** 2004. Contenido y formas de carbon en andosoles forestales: aproximacion a su dinamica. *Edadología*, 11:67:102
- Rogers, S. & M. McCormick.** 2007. Hots pots the carbon atlas. *The Guardian*. [Disponible por ejemplo en <http://eco.microservos.com/concienciacion/atlas-emisiones-carbono.html>]
- Rosete FA, Pérez JL, & Bocco G.** 2009. Contribución al análisis del cambio de uso de suelo y vegetación (1978-2000) en la Península de Baja California, México. *Investigación Ambiental*. 1:70-82.
- Roy, J & Saugier .**2001. Terrestrial Global productivity. Definitions and Milesones. In *Terrestrial Global Productivity*. Academic press. San Diego, pp. 1-6.
- Rouse, J., R. H. Haas, J. A. Schell, & D. W. Deering .**1973. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS, Third ERTS Symposium, NASA SP-351 I, 309- 317.
- Ruddiman, W. & Kutzbach, J.** 1991. Plateau uplift and climatic change. *Scientific American*. 264: 42-50.
- Ruhe, R.** 1960. Elements of the soil landscape. *Transactions of the Seventh International Congress of Soil Science*, Madison 4, 165-70.
- Ruiz, R.**2009. Deforestación y clima: aproximacion al análisis regional y modelado local en la region de la mariposa monarca, méxico. Tesis en Maestría en Geografía. UNAM.
- Ryan MG., Binkley D., Fownes JH., Giardina CP. & Senock RS.** 2004. An experimental test of the causes of forest growth decline with stand age. *Ecol. Monogr.* 74:393-414
- Rzedowski, J.** 2006. *Vegetación de México*, 1era edicion digital, Comision Nacional para el Conocimiento Y Uso de la Biodiversidad. México, pp.105.
- Sáenz, C., Rehfeldt, G., Crookston, N., Duval, P & Beaulie, J.** Estimaciones de cambio climatico para Michoacán. Implicaciones para el sector agropecuario y forestal y para la conservacion de la Mariposa Monarca. Consejo Estatal de Ciencia y Tecnología de Michoacán, Michoacán , Mexico, pp.22.
- Sánchez, E., Torres, M., Fernández, A., Aular, M., Pino, I y Granado, L.** 2000. Comparación del NDVI con el PVI y el SAVI como indicadores para la asignación de modelos de combustible para la estimacion del riesgo de incendios en Andalucía. *Tecnologías Geograficas para el Desarrollo Sostenible*, pp 164-174.
- Sala, O. E., Chapin, F. S., Armesto, J. J., Berlow, E., Bloomfield, J., Dirzo, R., et al.** 2000. Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science*, 287: 1770-1774

- Sanchez, E., Torres, M., Aguilar, M. Pino, I. & Granado, L.** 2000. Comparación del NDVI con el PVI y el SAVI como indicadores para la asignación de modelos de combustibles para la estimación del riesgo de incendios en Andalucía. *Tecnologías geográficas para el desarrollo sostenible*. Pp. 164-174.
- Santilli, M., P. Moutinho, S. Schwartzman, D. Nepstad, L. Curran & C. Nobre.** 2005. Tropical deforestation and the Kyoto protocol. *Climate Change*, 71: 267-276.
- Schlesinger, W. H.** 1985. Changes in soil carbon storage and associated properties with disturbance and recovery. In: Trabalka JR, Reichle DE (eds). *The Changing Carbon Cycle: A Global Analysis* New York: Springer-Verlag. The Economics of Ecosystems and Biodiversity.
- Schulze, D.** 2002. *An Introduction to soil Mineralogy*. Purdue University, West Lafayette, Indiana, pp. 19
- Secretaría de Gobernación y Gobierno del Estado de Michoacán.** Los Municipios de Michoacán. Primera Edición 1988. 375 pp.
- Seidel, D., S. Fleck, C. Leuschner, & T. Hammett.** 2011. Review of ground-based methods to measure the distribution of biomass in forest canopies. *Ann. For. Sci*, 68 :225–244.
- Serrato, R.** Captura de carbon en los suelos de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca. (en prensa). Tesis de Doctorado en Ciencias Ambientales, UAEM.
- Silver, W., Kueppers, L., Lugo, A., Ostertag, R. & Matzek, V.** 2004. Carbon sequestration and plant community dynamics following reforestation of tropical pasture. *Ecological Applications* 14(4) Suplemento, 2004: 1115-1127.
- Simmon, R.** 2005. *Paleoclimatology*. Earth Observatory, NASA.
- Shoji, S. & Dahlgren, R.** 1993. Volcanic ash soil-genesis, properties and utilization. *Developments in Soil Science* 21, Elsevier, Amsterdam, pp. 1-288.
- Smith, L.** 1994. Characterization of poorly ordered minerals by selective chemical methods. In : M. Wilson , (ed). *Clay mineralogy spectroscopic and chemical determinative methods*. Chapman and Hall Lodo, pp. 335-357.
- Smith, S.** 2003. *Soil Organic Carbon and Agriculture: Developing Indicators for Policy Analyses* . Agriculture and AgriFood Canada, Ottawa and Organization for Economic Cooperation and Development, Paris, pp. 329
- Somerville C., Bauer S., Brininstool G., Facette M., Hamann T., Milne J., Osborne E., Paredes A., Perrson S., Raab T., Vorwerk S., Youngs H.** 2004. Toward a systems approach to understanding plant cell walls. *Science*, 306: 2206–2211
- Spark, D.L.**, 2003. *Environmental Soil Chemistry*. Academic Press, San Diego.
- Stalone, M., Raymond. & Ey Smith, W.** 2001. Estimating near-infrared leaf reflectance from leaf structural characteristics. *American Journal of Botany*, 88:278-284.
- Steffen, B.** 2003. Measuring Agricultural Soil Organic Carbon—the Situation in Germany. In: Smith, S. (ed). *Soil Organic Carbon and Agriculture: Developing Indicators for Policy Analyses*. Agriculture and Agri–Food Canada, Ottawa and Organization for Economic Cooperation and Development, Paris, France, pp. 105–111.
- Stone, R & Hilborn.** 2000. *Universal Soil Loss Equation (USLE)*. FcatSheet. Agriculture Engineering, Ministry of Agriculture, Food and rural affairs.
- Strigul N., Pristinski D., Purves D., Dushoff J. & Pacala S.** 2008. Scaling from trees to forests: tractable macroscopic equations for forest dynamics. *Ecol. Monogr.* 78:523–45
- TEEB.** 2010. *The economics of ecosystems and biodiversity: mainstreaming the economics of nature: a synthesis of the approach, conclusions and recommendations of TEEB*. www.teebweb.org/linkclick.aspx?fileticket=byhdohl_tum%3d&tabid=1278&mid=2357.
- Trejo I. & Hernández J.** 1996. Identificación de selva baja caducifolia en el estado de Morelos, mediante imágenes de satélite. *Investigaciones Geográficas* 5: 11-18.
- Tuominen S. & Pekkarinen A.** 2004. Local radiometric correction of digital aerial photographs for multi source forest inventory. *Remote Sensing of Environment*, 89: 72–82
- Turner, M.** 1989. Landscape ecology: the effect of pattern on processes. *Annual Review of Ecology and Systematics*. 20:171-197
- UAEM.** 2002. Programa de Ordenamiento Ecológico de la Subcuenca Amanalco–Valle de Bravo. Universidad Autónoma del Estado de México Gobierno del Estado de México
- Van der Meer, P.J. & Bongers, F.** 1996. Patterns of tree-fall and branch-fall in a tropical rain forest in French Guiana. *J. Ecol*, 1996:19-29.
- Velázquez, M.** 2012. Efecto del cambio en la cobertura vegetal sobre la captura de carbono en suelo en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, Estado de México y Michoacán. Tesis de Licenciatura en Biología, UNAM, pp.107.
- Velasco, S., Champo, O., España, L & Baret, F.** 2010. Estimación del índice de área foliar en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca. *Fitotecnia Mexicana*, 33:169-174.
- Wada, K.** 1987. “Minerals formed and mineral formation from volcanic ash by weathering”. *Chemical Geology*, 60 : 17-28.
- Venegas, Y.** 2010. La implementación del Programa de Conservación para el Desarrollo Sostenible. Estudio de su Focalización en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca. Facultad de Ciencias Latinoamericanas y Sociales ± Sede México. 2010. Tesis de Maestría.
- Vidal, O., López, J & Rendon, E.** 2012. Trends in deforestation and forest degradation after a decade of monitoring in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve in Mexico. *Conservation Biology*, 28:177-186.

Villatoro, M., Hernández, C & Sancho, F. 2008. Comparación de los interpoladores IDW y Kriging en la variación espacial de pH, Ca, CICE y P del suelo. *Agronomía Costarricense* 32:95-105.

Vogelmann, J., B. N. Rock, & D. M. Moss. 1993. Red edge spectral measurements from sugar maple leaves. *International Journal of Remote Sensing*, 14: 1563–1575

Wang, D. H. & Medley, K. E. 2004. Land use model for carbon conservation across a midwestern USA landscape. *Landscape Urban Plan*, 69: 451–465.

Wander, M. 2004. Soil organic matter fractions and their relevance to soil function. In: Magdoff F, Ray RW (eds) *Soil organic matter in sustainable agriculture*. CRC Press, Boca Raton, pp 67–102

Waring, C., Stockmann, U., Malone, B., Whelan, B & McBratney, B. 2013. Is percent “Projected natural vegetation soil carbón” a useful indicator of soil condition?. *Progress in Soil science*, pp. 219.

Watkins, K., Ugaz, C., Carvajal, Liliana., Coppard, D., Fuentes, R., Gaye, A & Wei Ha. 2007. Informe sobre Desarrollo Humano 2007-2008. UN Plaza Nueva York: Programa de la Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD).

Williams, M. 2002. *Deforesting the earth: from prehistory to global crisis*. Chicago (Estados Unidos de América), University of Chicago Press.

Williams, J., Stow, D & Brower, L. 2007. The influence of forest fragmentation on the location of overwintering monarch butterfly in Central Mexico. *Journal of the Lepidopterists’ Society*, 61: 901-104

Wilding, L. P., & Drees, L. R. 1983. Spatial variability and pedology. In L. P. Wilding, N. E. Smeck & G. F. Hall (Eds.), *Pedogenesis and soil taxonomy. I. Concepts and interactions*, Amsterdam: Elsevier Science Publishers, pp. 83-116.

WWF. 2013. Degradación forestal en la zona núcleo de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca 2012-2013. Resumen ejecutivo, pp.4.

Whitmore, T. 1975. *Tropical rain forest of the far east*. Oxford University Press, London.

Wysocki, D. A., Schoeneberger, P. J., & LaGarry, H. E. 2000. Geomorphology of soil landscapes. In M. E. Sumner (Ed.), *Handbook of soil science*, E5-E39. Boca Raton FL: CRC Press

Xiong, X., Grunwald, S., Myers, D.B., Ross, C.W., Harris, W.G. & Comerford, N.B. 2014. Interaction effects of climate and land use/land cover change on soil organic carbon sequestration. *Sci. Total Environ*, 493: 974–982.

Yoneyama, T., Nakanishi, a., Morita & Liyanage. 2001. 13C values of carbón in cropland and forest soil in Japan. *Soil Science and Plant Nutrition*, 47:17-26

Yusuf, Y & Panagos, P. 2014. Reference area method for mapping soil carbon content at regional scale. *Geochemistry of the Earth’s surface*, 10:330-338

Zonneveld, J. I. S. 1979. *Land evaluation and land(scape) science*. Enschede, The Netherlands: ITC

Zon, R. 1910. *Forest resources of the world*. Washington, D.C., Government Printing Office.