



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ZARAGOZA**

**EVALUACIÓN DE LOS CAMBIOS EN LA
COBERTURA FORESTAL DEL
CORREDOR BIOLÓGICO
CHICHINAUTZÍN**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
BIÓLOGA**

P R E S E N T A:

ARADYD ANGÉLICA MORALES SÁNCHEZ



DIRECTOR DE TESIS:

DR. JOSÉ LÓPEZ GARCÍA

ASESOR INTERNO:

DR. EZEQUIEL HERNÁNDEZ PÉREZ

CIUDAD DE MÉXICO, 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



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 está 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.

Todos los seres vivientes estamos relacionados, amarrados de la misma raíz... Cuando el dios de dioses creó el cielo y la tierra, en el cielo sembró estrellas y en la tierra árboles, cada árbol y cada estrella con una misma raíz, es por eso que cuando cae un árbol, una estrella cae del cielo.

Chan Kin Viejo

AGRADECIMIENTOS

A mi Universidad, por darme la oportunidad de engrosar su larga fila de egresados, a la cual prometo retribuir tanta generosidad, así como a la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza por haberme brindado las bases para una carrera prospera que contribuya a la conservación de la naturaleza. Agradezco al Dr. José López García, Dr. Ezequiel Pérez Hernández, Dr. David Nahum Espinosa Organista, Dr. Efraín Reyes Ángeles Cervantes y al M en C. Genaro Montaña Arias por las contribuciones y asesoría para el presente trabajo.

A mis padres: Miguel Morales Flores y María Elena Sánchez Solorzano por todo el esfuerzo y apoyo para la realización de este trabajo y a lo largo de la carrera, sin ustedes el esfuerzo hubiese sido en vano, a mis hermanos Nancy, Gilberto y Brenda; por todo el apoyo aportado durante el tiempo en la escuela y a lo largo de mi vida.

También me es indispensable agradecer a todas las personas que me enriquecieron como tal, para que yo pudiera lograr mis metas y objetivos; entre las cuales se encuentran el Dr. Juan Manuel Rojano, Dr. Armando Cervantes, Biólogo. Ulises Guzmán, así como a mis compañeros de vida Mariana Chavarría, Isha Martínez, Emmanuel Jiménez, Ita Hernández, Nayeli Roa, Mario Maciel, Edwin Reyes y Blanca Rosa entre tantos más, a los cuales agradezco su amistad y aprendizaje.

Por último, agradezco a mi abuelo Francisco Morales y a mi cuñado Víctor Yáñez por el alojamiento brindado a lo largo de la carrera y para la realización de este trabajo.

ÍNDICE GENERAL

| | | |
|-------------|--|-----------|
| I. | Resumen | 1 |
| II. | Introducción | 2 |
| III. | Marco Teórico | 5 |
| | 1. Servicios ecosistémicos /servicios ambientales | 5 |
| | 1.1 Servicios ambientales hidrológicos..... | 6 |
| | 2. Coberturas forestales..... | 7 |
| | 3. Servicios ambientales generados por las coberturas forestales | 8 |
| | 4. Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos | 10 |
| IV. | Hipótesis de trabajo | 12 |
| V. | Objetivos | 12 |
| | 1. General..... | 12 |
| | 2. Particulares | 12 |
| VI. | Materiales y Métodos | 13 |
| | 1. Zona en estudio..... | 13 |
| | 1.1 Características geográficas | 13 |
| | 1.2 Características demográficas | 16 |
| | 1.3 Características hidrológicas | 16 |
| | 1.4 Vegetación y uso de suelo..... | 18 |
| | 1.5 Problemática ambiental..... | 20 |
| | 2. Material | 21 |
| | 3. Procesamiento de las imágenes | 22 |
| | 4. Delimitación | 22 |

| | | |
|--------------|--|-----------|
| 5. | Interpretación visual | 23 |
| 6. | Estimación del cambio de coberturas | 28 |
| 7. | Áreas y procesos de cambio | 29 |
| 8. | Tasa de cambio | 30 |
| 9. | Comparación de áreas con PSAH | 30 |
| VII. | Resultados..... | 31 |
| 1. | Superficie forestal | 31 |
| 2. | Coberturas forestales..... | 34 |
| 2.1 | Coberturas forestales templadas | 35 |
| 2.2 | Coberturas forestales tropicales | 37 |
| 3. | Estimación y procesos de cambio..... | 41 |
| 3.1 | Estimación de cambio en coberturas templadas..... | 43 |
| 3.2 | Estimación de cambio en coberturas tropicales | 44 |
| 4. | Áreas de cambio..... | 46 |
| 4.1 | Áreas con recuperación | 50 |
| 4.2 | Áreas con perturbación | 52 |
| 5. | Tasa de cambio..... | 54 |
| 6. | Áreas con pago por servicios ambientales hidrológicos (PSAH) | 54 |
| 7. | Estimación de cambio en áreas con PSAH..... | 56 |
| 7.1 | Estimación de cambio en áreas con PSAH clima templado..... | 56 |
| 7.2 | Estimación de cambio en áreas con PSAH clima tropical | 57 |
| VIII. | Discusión..... | 58 |
| IX. | Conclusión | 60 |
| X. | Literatura Citada | 61 |

INDICE DE CUADROS

| | |
|---|----|
| Cuadro 1. Clasificación de coberturas forestales arboladas. | 8 |
| Cuadro 2. Bosques dentro del Corredor Biológico Chichinautzín. | 18 |
| Cuadro 3. Clasificación de categorías forestales | 24 |
| Cuadro 4. Etiquetas para categorías templadas. | 25 |
| Cuadro 5. Etiquetas para categorías tropicales. | 25 |
| Cuadro 6. Comparación de superficies. | 33 |
| Cuadro 7. Superficie por categoría forestal y diferencias. | 34 |
| Cuadro 8. Categorías forestales templadas, superficies y diferencias. | 36 |
| Cuadro 9. Categorías forestales tropicales, superficies y diferencias. | 37 |
| Cuadro 10. Matriz de transición general..... | 42 |
| Cuadro 11. Procesos de cambio. | 42 |
| Cuadro 12. Matriz de transición para coberturas templadas..... | 44 |
| Cuadro 13. Procesos de cambio para coberturas templadas..... | 44 |
| Cuadro 14. Matriz de transición para coberturas tropicales. | 45 |
| Cuadro 15. Procesos de cambio para coberturas tropicales | 46 |
| Cuadro 16. Tasas de cambio periodo 1994-2017. | 54 |
| Cuadro 17. Áreas con PSAH dentro de la zona en estudio. | 54 |
| Cuadro 18. Procesos de cambio en áreas con PSAH | 56 |
| Cuadro 19. Procesos de cambio en áreas con PSAH de clima templado. | 57 |
| Cuadro 20. Procesos de cambio en áreas con PSAH clima tropical. | 57 |

INDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Clasificación de servicios ambientales. | 6 |
| Figura 2. Esquema del funcionamiento del PSAH. | 11 |
| Figura 3. Mapa de Áreas Naturales Protegidas en la zona en estudio | 13 |
| Figura 4. Mapa de municipios en la zona en estudio. | 14 |
| Figura 5. Mapa de ubicación del corredor dentro del Bosque de Agua. | 15 |
| Figura 6. Laguna de Zempoala | 17 |
| Figura 7. Tala clandestina | 21 |
| Figura 8. Unión de las ANP. | 23 |
| Figura 9. Digitalización y etiquetado. | 26 |
| Figura 10. Matriz de transición. | 29 |
| Figura 11. Gráfica de superficie forestal y no forestal. | 31 |
| Figura 12. Comparación de la superficie forestal y no forestal | 32 |
| Figura 13. Gráfica de superficies por categoría forestal. | 35 |
| Figura 14. Gráfica de superficies para categorías forestales templadas. | 36 |
| Figura 15. Grafica de superficies para categorías forestales tropicales. | 38 |
| Figura 16. Mapa de coberturas forestales 1994. | 39 |
| Figura 17. Mapa de coberturas forestales 2017. | 40 |
| Figura 18. Mapa de áreas y procesos de cambio | 47 |
| Figura 19. Áreas y procesos de cambio positivos. | 48 |
| Figura 20. Áreas y procesos de cambio negativos. | 49 |
| Figura 21. Areas con recuperación por densificación. | 50 |

| | |
|--|----|
| Figura 22. Áreas con recuperación por reforestación..... | 51 |
| Figura 23. Áreas con recuperación por forestación. | 51 |
| Figura 24. Áreas con perturbación por degradación forestal..... | 52 |
| Figura 25. Áreas con perturbación por deforestación. | 53 |
| Figura 26. Áreas con perturbación por cambio de uso de suelo..... | 53 |
| Figura 27. Áreas con pago por servicios ambientales hidrológicos. | 55 |

I. Resumen

Se realizó una evaluación de los cambios en la densidad de la cobertura forestal del Corredor Biológico Chichinautzín periodo 1994-2017, con el objetivo de analizar la influencia del programa Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos (PSAH) en dichas coberturas, bajo la hipótesis de que las áreas beneficiadas por este programa presentarían procesos de recuperación en cuanto a densidad de la cobertura forestal. La estimación de cambio se realizó mediante la interpretación visual de Ortofotos de 1994 e imágenes Spot del año 2017 a escala 1: 5,000. El análisis se realizó a nivel general en toda la zona en estudio y particularmente en las áreas con PSAH, adicionalmente se distinguieron por afinidad climática, por un lado, coberturas templadas y por otro, coberturas tropicales. En general los resultados mostraron que, en 23 años, se produjeron cambios en el 30.8% (19,620 ha) del corredor; el 78.9% (15,477 ha) fueron cambios de recuperación y 21.1% (4,143 ha) cambios de perturbación; el 82% (16,082 ha) de los cambios se presentaron en coberturas templadas y el 18% (3,538 ha) en coberturas tropicales. Particularmente las áreas bajo el programa PSAH (10,862 ha) presentaron cambios en el 73% (7,936 ha); 82.4% (6,536 ha) cambios de recuperación, los cuales estuvieron mejor representados en las coberturas templadas, mientras el 17.6% (1,399 ha) sufrieron cambios de perturbación mayormente en coberturas tropicales, lo cual indica que el programa PSAH tuvo una influencia positiva que ha favorecido y coadyuvado a la recuperación de las coberturas forestales dentro del corredor.

II. Introducción

Los recursos forestales son de gran importancia a nivel mundial dado que representan el capital natural de un país (Velázquez *et al.*, 2002; Velázquez, 2011). También proveen materia prima para diferentes industrias, representan el hábitat donde distintas especies se desarrollan, interactúan y evolucionan (FAO, 2016; Pompa, 2016). En estos sistemas forestales se presentan importantes procesos ecológicos, por lo que su conservación resulta indispensable para el buen funcionamiento ecosistémico, ya que proporcionan invaluable bienes y servicios (Sarukhán *et al.*, 2009; FAO, 2016). Sin embargo, uno de los principales problemas que enfrentan estos ecosistemas naturales es su deforestación y fragmentación (Paz, 2005).

En México, se han realizado diversos estudios con la finalidad de conocer el estado de conservación en el que se encuentran los recursos forestales. El primer inventario forestal fue realizado de 1961 a 1985, en este estudio se delimitaron las zonas maderables comerciales, posteriormente se realizó una actualización para el Inventario Nacional de Gran visión de 1991-1992 con métodos indirectos, en el Inventario Nacional Periódico de 1994 se zonificaron los terrenos forestales con base en sus funciones y aptitudes. Con el desarrollo de nuevas tecnologías y el uso de Sistemas de Información Geográfica, a partir del 2000, se actualizaron las cartas de uso de suelo y vegetación, mediante el uso de imágenes satelitales Landsat ETM 7, y la posterior actualización en el 2007 con imágenes de satélite SPOT (CONAFOR, 2009; CONAFOR, 2012a).

De acuerdo con Informe del Inventario Nacional Forestal de Suelos 2009-2014, el 70.5% de la superficie nacional, que equivale aproximadamente a 137.8 millones de hectáreas es superficie forestal, de éstas el 47.7% (65.7 millones de hectáreas) corresponde a superficie arbolada, conocida como bosque que incluye bosques y selvas; el restante 52.3 % corresponde a otras masas forestales, como matorrales. El

29.5% restante del territorio nacional corresponde a superficie no forestal que incluye a otros tipos de vegetación y usos de suelo como; el agropecuario y urbano (CONAFOR, 2018).

El principal problema que enfrentan las coberturas forestales tanto en México como en América Latina es el cambio el uso del suelo hacia actividades agropecuarias y desarrollo humano (CONAFOR, 2012b). El cambio de uso de suelo es la actividad humana que genera más impacto sobre la vegetación forestal. Esta actividad se refleja en la deforestación (Gardner *et al.*, 2009), con diversos efectos negativos sobre la estructura, función y dinámica de los sistemas ecológicos a diferentes escalas espaciales y temporales (Armenteras *et al.*, 2003). Se reconoce que la deforestación influye significativamente en la estabilidad microclimática, la erosión y degradación del suelo, y en el incremento de los gases de efecto invernadero (Heistermann *et al.*, 2006; Lambin y Geist, 2006); y está considerada como la principal causa de la pérdida de biodiversidad (Sala *et al.*, 2000;). Entre las coberturas que presentan mayor afectación se encuentran los bosques tropicales. Estos bosques son deforestados a una tasa anual del 1.58%, mientras que los bosques templados desaparecen a una tasa anual de 0.79% (SEMARNAT, 2016).

Ante esta problemática de deforestación en el país, desde el 2003 se implementó el programa Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos (PSAH) el cual surge como una estrategia de política pública para proteger las cuencas hidrológicas y preservar el recurso agua, este programa involucrar a los poseedores de bosques, en su conservación y cuidado para el buen funcionamiento de los servicios ambientales. Sin embargo, hay pocos estudios que revelen los efectos que este programa tiene sobre el estado de las coberturas forestales de las áreas beneficiadas (López y Manzo, 2015; Perevochtchikova y Saavedra, 2017; Mora-Carvajal *et al.*, 2019), por lo que este estudio se enfoca en el análisis del cambio multitemporal de las áreas con cobertura forestal, con la finalidad de contextualizar los procesos de alteración y recuperación que enfrenta el Corredor Biológico

Chichinautzín. Este estudio permitió analizar si el programa de pago por Servicios Ambientales Hidrológicos realmente cumple con el objetivo de conservar las cuencas y las áreas forestales. Además, esta información facilitará priorizar acciones de manejo, acordes a las características y complejidades de la zona en estudio.

III. Marco Teórico

1. Servicios ecosistémicos /servicios ambientales

Servicios ecosistémicos o servicios ambientales son términos utilizados indistintamente para describir un mismo escenario (Torrez, 2018). El concepto de Servicios Ecosistémicos (SE) surgió por primera vez en la Cumbre de las Naciones Unidas celebrada en rio de Janeiro en 1992, donde por primera vez se definió cómo la suma de todos los beneficios que las personas obtienen de los ecosistemas naturales (ONU, 1992). En México, la Ley General de Desarrollo Forestal vigente define a los Servicios ambientales (SA) como el conjunto de beneficios que las personas reciben directa o indirectamente de los diferentes ecosistemas forestales de manera natural o a través del manejo forestal sustentable (SEMARNAT, 2018). La diferencia entre SE y SA no está claramente definida, por lo que ambos son utilizados en la literatura como sinónimos (Calzada, 2015; Torrez, 2018) en este estudio se utilizará el concepto de SA por ser el más utilizado en el país y hacer referencia a los ecosistemas forestales.

En general los servicios ambientales se refieren al conjunto de beneficios que la sociedad obtiene de los ecosistemas naturales (Wunder, 2006; Wunder *et al.*, 2007), estos pueden clasificarse de acuerdo con su función en el ambiente, donde se reconocen cuatro fundamentales: soporte, provisión, regulación y de carácter cultural (MEA, 2005) (Figura 1). También pueden clasificarse de acuerdo con su aplicación en políticas públicas y de legislación (Wunder, 2006).

- 1) Almacenamiento de carbono.
- 2) Protección de la Biodiversidad.
- 3) Protección de cuencas hidrográficas
- 4) Belleza escénica.

Entre éstos se reconoce como más importante la protección de cuencas, debido a su relación con el recurso hídrico (ciclo hidrológico), por su importancia para los ecosistemas y la subsistencia de la población humana (Perevochtchikova *et al.*, 2004).

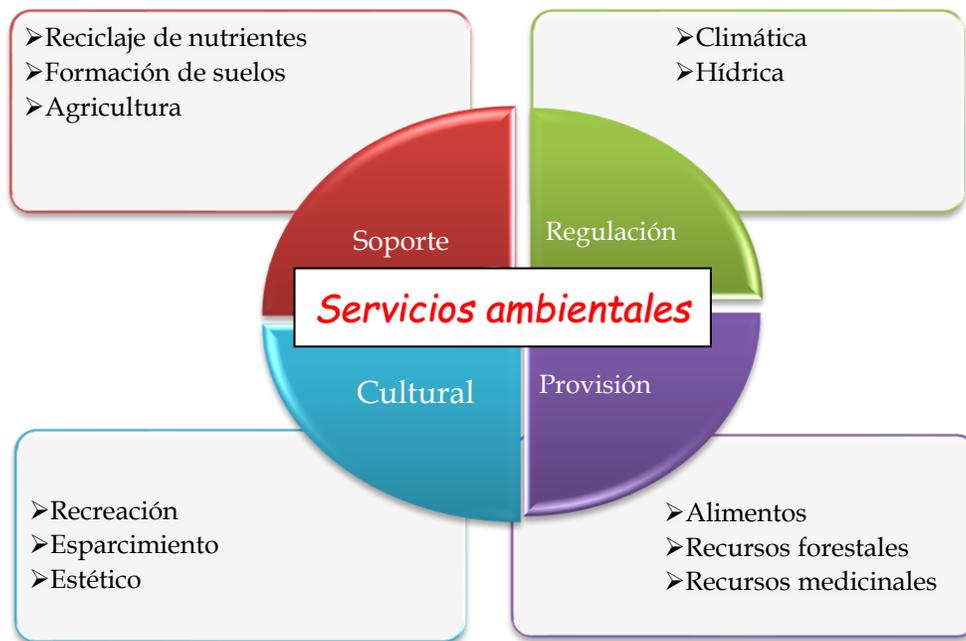


Figura 1. Clasificación de servicios ambientales y ejemplos de acuerdo con su función. (Millennium Ecosystem Assessment, 2005).

1.1 Servicios ambientales hidrológicos.

Los servicios ambientales hidrológicos (SAH) o también llamados servicios de cuenca (SEMARNAT, 2018), son aquellos relacionados con el ciclo hidrológico, donde la disponibilidad del agua depende de la capacidad de los ecosistemas para captarla y almacenarla (Fregoso, 2006). Estos servicios, se producen a escala de cuenca hidrológica por lo que un cambio dentro de ésta en sus componentes, procesos o condiciones influiría directamente en el buen funcionamiento hídrico. En este sentido, se reconoce el papel que juega la vegetación, en especial las coberturas forestales (Calzada, 2015; CONAFOR, 2012b).

2. Coberturas forestales

Una cobertura forestal se refiere a la presencia física de vegetación arbolada (vegetación leñosa con altura superior a cinco metros), mejor conocido como bosque, cuya cubierta mínima de copas es del 10 % y se extiende sobre una superficie mayor a 0.5 ha (FAO, 2018). En el mundo, se estima que los bosques ocupan 4 mil millones de hectáreas, que cubren aproximadamente el 31% de la superficie total terrestre. México ocupa el lugar número doce a nivel mundial en cuanto a superficie boscosa, con 65.7 millones de ha (FAO, 2018; CONAFOR, 2018).

Los cambios en las coberturas forestales pueden ser descritos como continuos procesos de perturbación (disminución) y recuperación (expansión) del bosque a lo largo del tiempo (FAO;2016). Con base en los últimos Inventarios Nacionales Forestales y de Suelos en el país, estos procesos de pérdida se han ido reduciendo, pasando de 354 mil ha/año de 1990-2000 a 155 mil ha/año de 2005-2010; por su parte la última evaluación de los recursos forestales mundiales reporta una pérdida neta de 129 millones de ha, de 1990 al 2015 (CONAFOR, 2012a; 2019). Estas pérdidas generalmente son causadas por la deforestación, el cual es un cambio drástico en el uso del suelo, pues en este proceso se pierde la cubierta forestal (Aguilar *et al.*, 2000; FAO, 2000).

De acuerdo con la clasificación de vegetación propuesta por Rzedowski (1978) la cubierta forestal se puede diferenciar por su afinidad climática, distinguiéndose por tipo de clima, templado y tropical (Cuadro 1). Donde los primeros registran una tasa de deforestación de 0.79% y los segundos 1.58% anual (SEMARNAT, 2016). Las coberturas de regiones de clima templado que tienen un mayor grado de amenaza se ubican en la Sierra madre del Sur, la Sierra Madre de Chiapas y la faja volcánica transmexicana, mientras que los de regiones tropicales que se encuentran más vulnerables se hayan en las costas del Pacífico y del Golfo de México (Aguilar *et al.*, 2000).

Cuadro 1. Clasificación de coberturas forestales arboladas, modificado de Rzedowski 1978.

| | TIPO DE CLIMA | ASOCIACIÓN FORESTAL | TIPO DE VEGETACIÓN |
|---------------------------------|---------------|------------------------|---|
| COBERTURAS FORESTALES ARBOLADAS | Templado | Bosque de coníferas | Bosque de pino Bosque de oyamel |
| | | Bosque mixto | Bosque de pino-Bosque de encino Bosques de encino-Bosque de pino |
| | | Bosque de latifoliadas | Bosque de encino |
| | Tropical | Bosque tropical | Bosque tropical caducifolio |
| | | Bosque transicional | Bosque tropical caducifolio-Bosque de encino |
| | | | |

3. Servicios ambientales generados por las coberturas forestales

El servicio de mayor importancia es el relacionado con el ciclo del agua, donde los bosques juegan un papel fundamental. La relación bosque-agua, se caracteriza por ser un sistema dinámico, que permite la regeneración de este recurso (Bruschweiler *et al.*, 2004); debido a que los bosques aumentan los niveles de humedad en el suelo, incrementando la captación, purificación, reposición y disminuyendo la escorrentía del agua, en comparación con otros tipos de vegetación como pastizales, matorrales o cultivos agrícolas (Calder, 2004).

Los bosques actúan interceptando el agua de lluvia por medio de sus hojas, esta agua es canalizada por medio de sus ramas, troncos y raíces hacia el suelo, una vez en el suelo el agua es captada y almacenada mediante la hojarasca y la materia orgánica generando su lenta filtración, lo que permite la recarga en los mantos acuíferos (Bruijnzeel, 1990 citado en Manson, 2004); Además, se ha observado que los bosques densos y maduros interceptan más agua de lluvia, en comparación con uno joven, también se ha descubierto que los bosques de coníferas interceptan más agua de lluvia que los bosques de latifoliadas de hoja ancha (Bruschweiler *et al.*, 2004).

Otros servicios ambientales que prestan las coberturas forestales son: La producción de biomasa, generando principalmente materia prima para las industrias de construcción y como fuente de energía, además de productos no maderables, entre los que se encuentran alimentos como semillas, hongos, especias, fibras, plantas comestibles y medicinales (Bishop y Landell-Mills 2003; Velázquez, 2011). Favorecen la generación, protección y mantenimiento del suelo; mediante el reciclaje de nutrientes. Estabilizan el paisaje minimizando los ciclos de inundación y sequía; también contribuyen a controlar la erosión del suelo y la sedimentación (Manson, 2004); además de fungir como reservorios genéticos, debido a que son hábitat de un gran número de especies vegetales y animales (Pagiola *et al.*, 2003). Están involucrados en procesos complejos como la captación del carbono e intervienen en los ciclos biogeoquímicos, participan en la regulación del clima a escala local, regional y mundial (Manson, 2004; CONAFOR, 2014). También aportan valores estéticos como áreas naturales, generalmente utilizadas para la recreación, el esparcimiento, debido a que aportan una gran belleza escénica (Costanza *et al.*, 1997).

La pérdida de bosques no solo puede afectar la cantidad y calidad de agua (Velázquez, 2011), sino que repercute directamente en el correcto funcionamiento de todas las interacciones en las que participa (Pagiola *et al.*, 2003; Manson, 2004; SEMARNAT, 2018), aunado a que pueden ocasionar la extinción local de especies, aumentar la ocurrencia de plagas, disminuir la polinización, entre otros (Aguilar y Arriaga, 2000). El remplazo de estas coberturas se debe principalmente para obtener recursos maderables ya sea de forma legal (mediante manejo sustentable) o ilegal (tala clandestina) (Velázquez, 2011), así como en la utilización del suelo para la agricultura o el desarrollo urbano (CONAFOR, 2012b).

4. Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos

Los servicios ambientales en general son subestimados debido a que se da por hecho su existencia como permanente y gratuita; tal es el caso de los servicios hidrológicos (Wunder, 2007); ante esta problemática de falta de una valoración económica y el reconocimiento de su importancia a nivel mundial, surge en Costa Rica en 1997 por primera vez el Programa de Pago por Servicios Ambientales (PSA), como una forma de reconocer y remunerar la importancia de estos servicios (Velázquez, 2011), cuyo esquema se basa en principios de mercado que tienen como objetivo formar puentes entre los propietarios directos de los bosques y los usuarios beneficiados por los servicios que generan (Pagiola *et al.*, 2003; Wunder, 2006). Este enfoque contempla la importancia de compensar económicamente a los dueños y poseedores de terrenos boscosos para que puedan conservar este recurso, pues se reconocen las fuertes presiones sobre el uso de la tierra (Wunder, 2007).

En México, el PSA surgió en el año 2003 como parte de la estrategia del gobierno federal para poder conservar el recurso forestal (COLPOS, 2004). Este programa consiste en dar una compensación económica a los propietarios de zonas boscosas que deseen conservar sus bosques, para el bien de la sociedad (Pagiola *et al.*, 2003; Manson, 2004; Fregoso, 2006; Perevochtchikova y Saavedra, 2017). Bajo este programa los usuarios en las partes bajas de la cuenca pagan a los propietarios de áreas boscosas en la parte alta por adoptar medidas que conserven sus bosques (Figura 2).

El principal objetivo del PSA es reducir la deforestación, generando incentivos para preservar los bosques y así elevar su competitividad ante la agricultura y ganadería (Velázquez, 2011), seguido de poder combatir la pobreza ya que los terrenos boscosos en el país son de propiedad comunal y ejidal, que generalmente son población en situación de pobreza, donde su única fuente de

supervivencia es tomar los recursos directamente para su posterior venta (COLPOS, 2004; Pompa, 2016).

Inicialmente el programa contemplaba el Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos (PSAH) y el Pago por Servicios Ambientales para la captura de carbono y derivados de la biodiversidad (PSA-CABSA), para fomentar el establecimiento y mejora de sistemas agroforestales. Sin embargo, en el año 2006 los dos programas PSAH y PSA-CABSA se fusionaron bajo el concepto de Pago por Servicios Ambientales (PSA), posteriormente en el 2008 se instituyó el PSA local, el cual dependía del estado y obtenía recursos en un 50% de la CONAFOR y el otro 50% de los tres órdenes de gobierno (municipal, estatal y federal), además de asociaciones civiles y asociaciones privadas (Torrez, 2018). El PSAH estableció el pago de \$400 pesos anuales por hectárea, en bosques mesófilos y \$300 pesos al año por hectárea en otro tipo de bosques (Perevochtchikova *et al.*, 2004).

De acuerdo con la Comisión Nacional Forestal los requisitos que se deben de cumplir para ser considerado dentro de este programa son los siguientes:

- 1) Ubicarse en zonas con mayores escasas de agua y que cuenten con poco abastecimiento.
- 2) Contar con una cubierta forestal mayor al 50% por ha, priorizando bosques de pino, encino, oyamel, mesófilo de montaña, selva baja, selva mediana y los bosques mixtos pino-encino.
- 3) Estar localizado en zonas con alto riesgo de deforestación.
- 4) Poseer un alto grado de marginación.



Figura 2. Esquema del funcionamiento del Pago por Servicio Ambiental

IV. Hipótesis de trabajo

El programa de pago por Servicios Ambientales Hidrológicos del Corredor Biológico Chichinautzín se basa en la preservación de las coberturas forestales, entonces las áreas que fueron beneficiadas en este programa tendrán una recuperación de la cobertura forestal.

V. Objetivos

1. General

Analizar la influencia del programa de Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos en la cobertura forestal del Corredor Biológico Chichinautzín.

2. Particulares

- Estudiar el estado de las coberturas forestales del Corredor Biológico Chichinautzín antes y después de la aplicación del programa Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos en el periodo 1994-2017.
- Estimar las tasas de cambio en las coberturas forestales del Corredor Biológico Chichinautzín periodo 1994-2017.
- Reconocer las áreas que presentaron cambios dentro del corredor periodo 1994-2017.

VI. Materiales y métodos

1. Zona en estudio

1.1 Características geográficas

El Corredor Biológico Chichinautzín se localiza en la parte central del país, en la vertiente sur de la Faja Volcánica Transmexicana entre las coordenadas $18^{\circ} 53' 21''$ y $19^{\circ} 07' 50''$ latitud norte y $98^{\circ} 51' 56''$ y $99^{\circ} 21' 02''$ longitud oeste (Vega *et al.*, 2008). Se encuentra integrado por tres Áreas Naturales Protegidas (ANP); Parque Nacional (PN) Lagunas de Zempoala (decretado en 1936) con 4,554 hectáreas, Parque nacional el Tepozteco (decretado en 1937) con 23 273 ha y un Área de Protección de Flora y Fauna (APFF) con el mismo nombre dividida en dos fracciones con una superficie de 35, 973 ha (decretado en 1988). El corredor abarca una superficie total de 63, 801 ha (CONANP, 2017), ocupando la parte norte del estado de Morelos, la región sur de la Ciudad de México y el sureste del Estado de México (Figura 3).

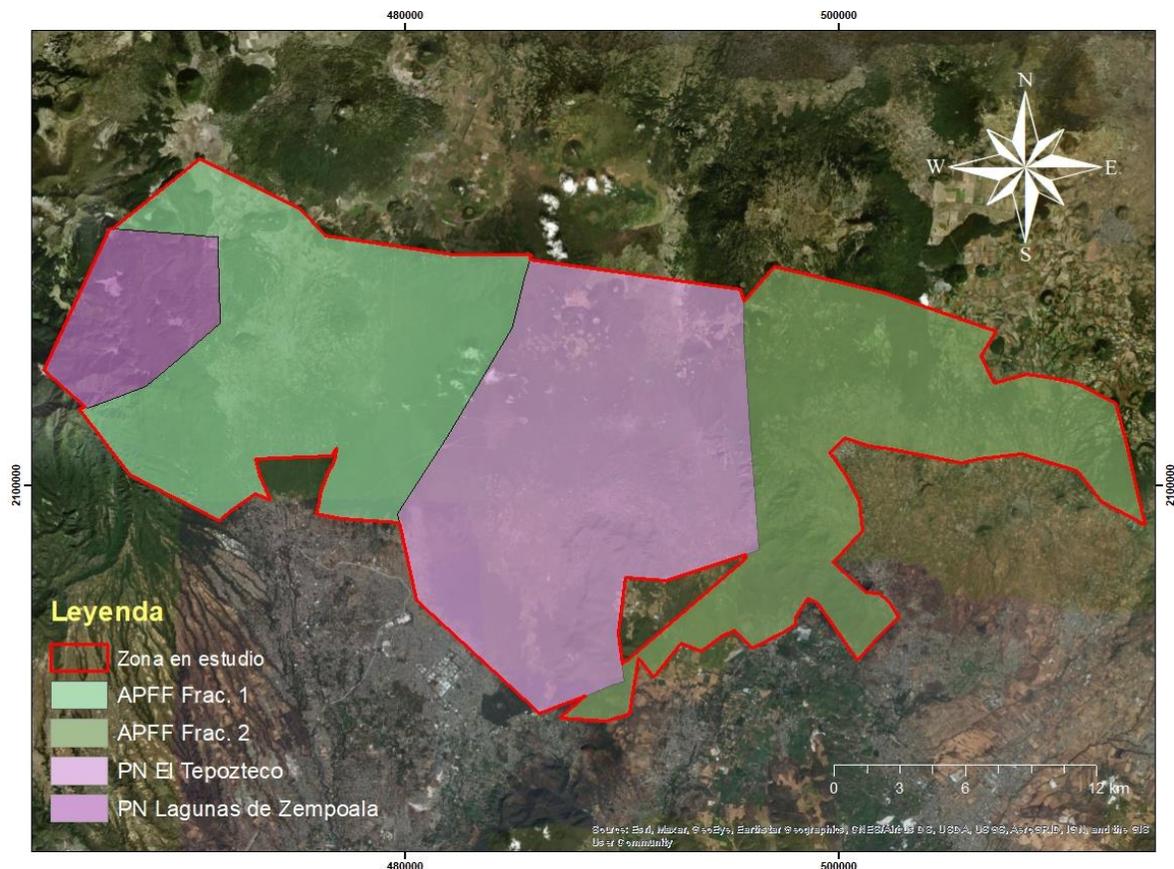


Figura 3. Áreas Naturales Protegidas que integran el Corredor Biológico Chichinautzín.

Políticamente incluye los municipios de Milpa Alta y Tlalpan en la ciudad de México; Xacatlaco, Juchitepec, Ocuilan y Tepetlixpa pertenecientes al Estado de México y Huitzilac, Tlalnepantla, Tepoztlán, Totolapan, Cuernavaca, Atlatlahucan, Tlayacapan y Yauatepec en el estado de Morelos (INEGI, 2016) (Figura 4).

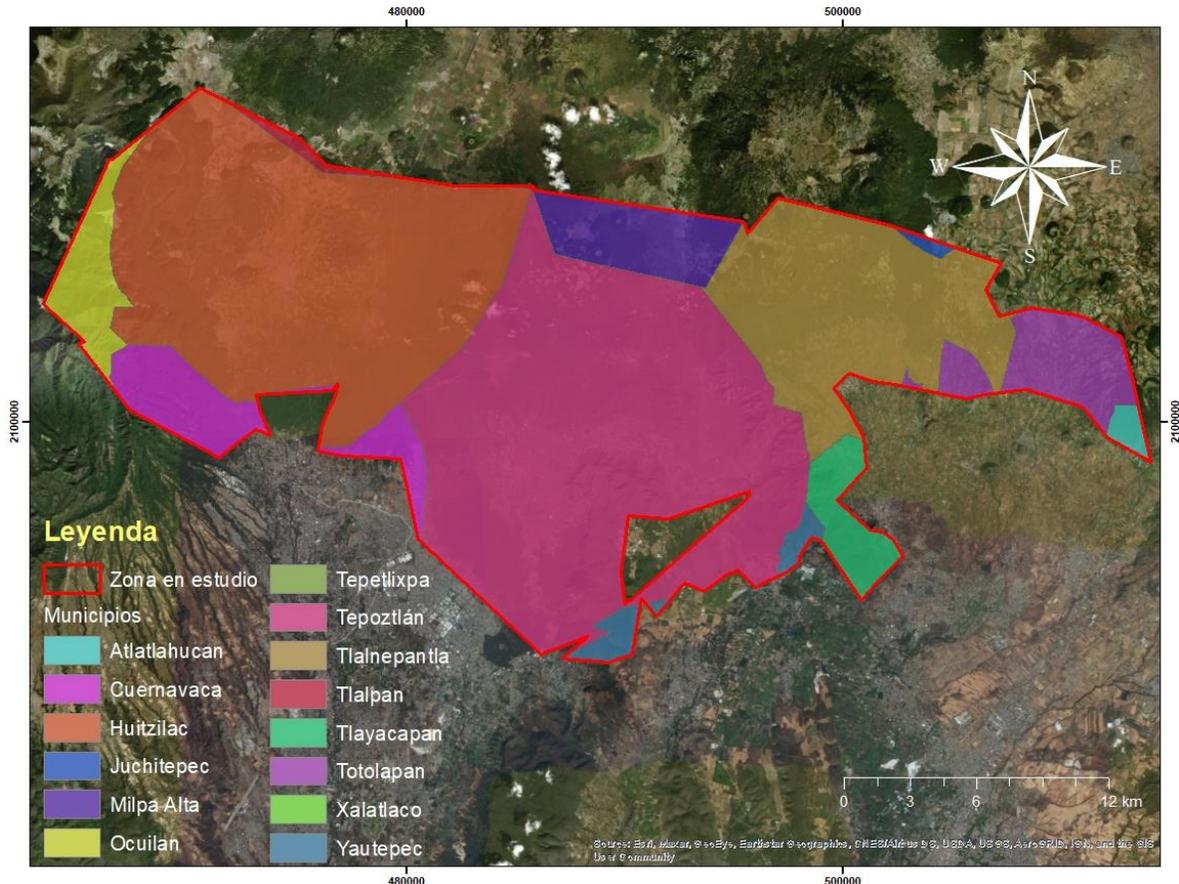


Figura 4. Municipios dentro de la zona en estudio.

La zona en estudio forma parte del denominado Bosque de Agua (Figura 5), el cual está integrado por las Sierras de Chichinautzín, Zempoala, Ajusco y las Cruces. El Bosque de Agua es considerado una región de alta prioridad de conservación para el país, debido a que se encuentra conformado por las partes altas de las cuencas hidrográficas del Valle de México, del Balsas, Lerma-Chapala y Pánuco (ECOBA, 2012).

Además, funge como barrera natural para controlar la expansión y el crecimiento demográfico de las ciudades de México y Cuernavaca (CONANP, 2004).

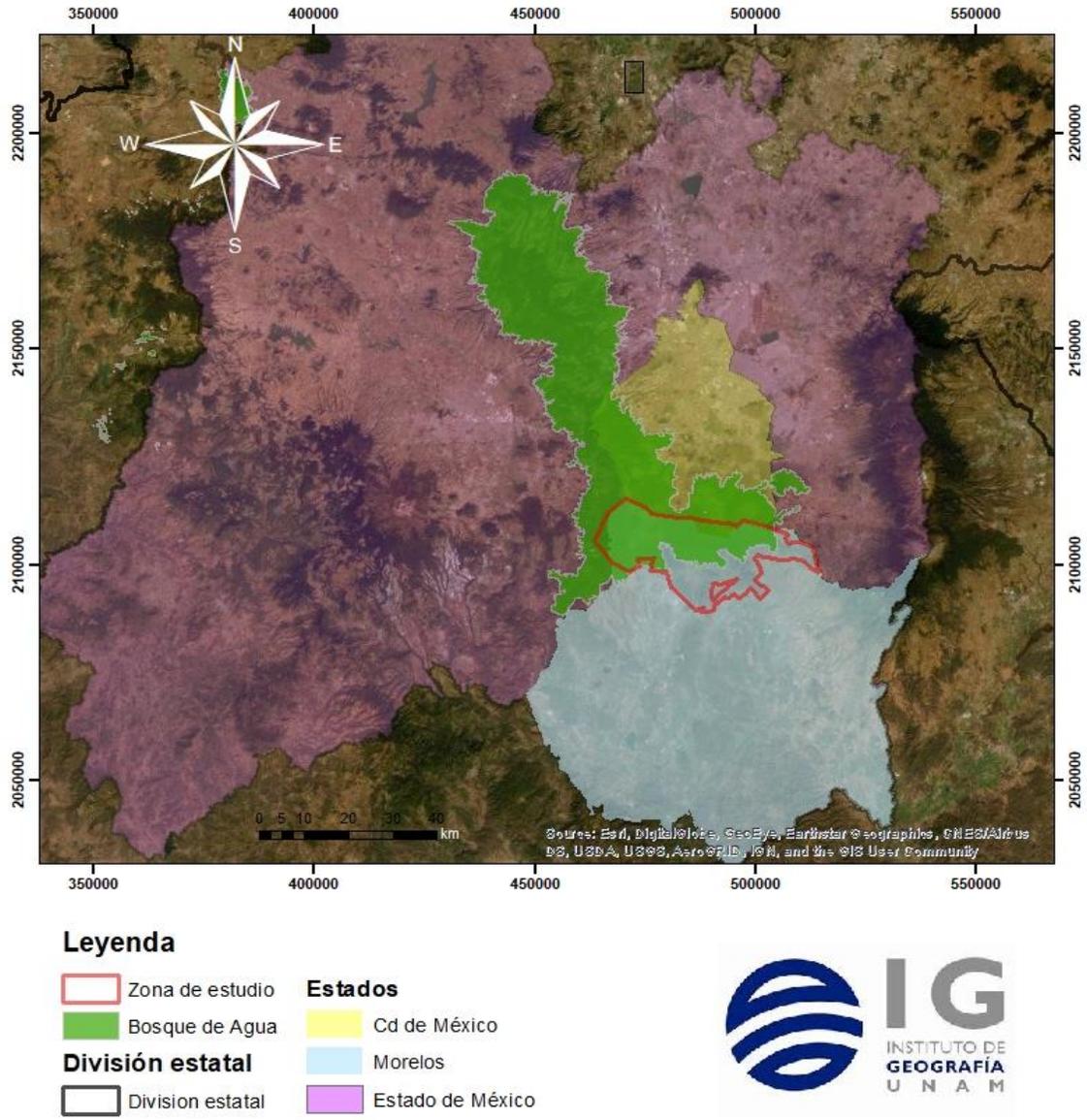


Figura 5. Mapa de ubicación del corredor dentro del Bosque de Agua.

1.2 Características demográficas

Dentro del Corredor Biológico durante el año 1996 se estimaba una población cercana a los 50,000 habitantes, sin embargo, de acuerdo con la última encuesta intercensal 2015, se reporta una población de 77, 057 personas viviendo dentro de las ANP que integran al corredor (INEGI, 1996 y 2017).

Los centros poblacionales más grandes son la ciudad de Cuernavaca, Tepoztlán, Amatlán, Tlayacapan y Huitzilac. Tepoztlán es de gran importancia ya que su cabecera municipal y zona urbana se encuentran dentro de los límites del área protegida. En Tepoztlán y Amatlán hay un flujo considerable de turismo nacional e internacional, debido a que ahí se encuentra la zona arqueológica el Tepozteco en la cima del cerro Ehecatépetl (INECC, 2019). El parque Lagunas de Zempoala también recibe una afluencia considerable de turismo debido a que sus lagunas son usadas como sitio de esparcimiento y recreación, ya que brindan una gran belleza escénica (Pichardo, 2016)

1.3 Características hidrológicas

El corredor se ubica mayormente dentro de la región hidrológica número dieciocho (RH18) en la RH del río Balsas y en la cuenca del Río Grande de Amacuzac (Santillán *et al.*, 2010). Los rasgos hidrológicos más sobresalientes del Corredor Biológico se refieren a su importancia dentro del balance hídrico regional, debido a que se encuentra localizado en las partes altas de las cuencas (CONANP, 2004), las cabeceras de las subcuencas Apatlaco y Yautepec presentes en el corredor, recargan de forma vertical a los acuíferos (Vega *et al.*, 2008; Santillán *et al.*, 2010), debido a tres factores fundamentales: su alta permeabilidad, la cual es la más alta en el estado de Morelos con un índice de infiltración del 70-80%; precipitación irregular que se encuentra alrededor de los 1200 mm de precipitación media anual (CONAFOR, 2014) y una cubierta forestal mayor cercana al 70% (Vega *et al.*, 2008). Estos factores

permiten la acumulación de agua en las partes bajas de la cuenca, permitiendo el abastecimiento de agua del que dependen 22 millones de personas que habitan en las ciudades de México, Toluca y Cuernavaca (ECOBA,2012).

En cuanto a cuerpos de agua superficiales el parque Lagunas de Zempoala cuenta con siete lagos: Zempoala, Compila, Tonatiahua, Acomantla, Acoyotongo, Quila y Hueyapan. De los cuales Zempoala, Tonatiahua y Acoyotongo, son cuencas lacustres endorreicas, con condiciones hidrológicas estáticas y mantienen agua durante todo el año. Compila, que esta aun lado de Zempoala (Figura 6) por sus grandes filtraciones se vacía durante la época de sequía, Quila y Hueyapan son lagunas secas puesto que su agua fue entubada para abastecer a las comunidades aledañas y Acomantla también es una laguna cuya desecación ocurrió de forma natural (Santillán *et al.*, 2010; Pichardo, 2016).



Figura 6. Laguna de Zempoala, Corredor Biológico Chichinautzín, Morelos (Fotografía de Topiltzin Contreras).

1.4 Vegetación y uso de suelo

Debido a que la zona en estudio se localiza entre dos regiones biogeográficas, la Neártica y la Neotropical, posee vegetación de climas templados y tropicales. La vegetación dominante es de tipo arbóreo, la cual forma bosques que cubren aproximadamente el 70% de su superficie (Vega *et al.*, 2008; FMCN - CONANP, 2009). Las coberturas forestales están formadas en un 52.8% por bosques templados, y en un 16.3% por bosques tropicales (Cuadro 2). El principal uso de suelo es el agropecuario que cubre el 26.8% de la superficie, el restante es ocupado por matorrales, asentamientos humanos, afloramientos rocosos y derrames lávicos (FMCN - CONANP, 2009; Bonilla-Barbosa *et al.*, 2010).

Cuadro 2. Bosques dentro del Corredor Biológico Chichinautzín, modificado de (Vega *et al.*, 2008).

| | TIPO DE CLIMA | ASOCIACIÓN FORESTAL | ha | % |
|-----------------------|---------------|------------------------|-------|-------|
| COBERTURAS FORESTALES | TEMPLADO | Bosque de Coníferas | 16286 | 28.39 |
| | | Bosque Mixto | 7159 | 11.16 |
| | | Bosque de Latifoliadas | 10477 | 16.33 |
| | TROPICAL | Bosque Tropical | 9259 | 14.43 |
| | | Bosque Transicional | 1235 | 1.93 |

1.4.1 Bosques de clima templado

Bosques de coníferas

Los bosques de coníferas conforman importantes masas forestales, principalmente en las partes altas de la faja volcánica transmexicana, que incluye a la parte norte del estado de Morelos estos bosques están conformados principalmente por bosques de pino y bosques de oyamel.

- Bosques de pino: Estos bosques presentan un estrato arbóreo que oscila entre los 8 a 35 metros de altura, suele presentarse en suelos rocosos de origen ígneo entre los 1,500 y 4, 000 msnm, se encuentran principalmente los municipios de Huitzilac, Tepoztlán, Tlalnepantla y Totolapan. Pueden estar dominados por uno o más especies del género *Pinus* como *Pinus Moctezumae*, *P. Ayacahuite*, *P. michoacana* (CONABIO y UAEM, 2004).
- Bosques de Oyamel: Éstos suelen estar restringidos a las zonas de alta montaña, entre los 2,800 y 3,600 msnm, en laderas de cerros, las cuales les brindan protección contra vientos y rayos solares. Generalmente forman bosques densos con una altura hasta de 50 m (Vega *et al.*, 2008), de la especie *Abies religiosa*, se distribuye principalmente en el parque lagunas de Zempoala y en los conos volcánicos del Chichinautzín (CONABIO y UAEM, 2004).

Bosques Mixtos

Estos bosques son resultado de las codominancias entre los géneros: *Pinus* y *Quercus*, estos géneros suelen encontrarse asociados frecuentemente. Se denominan bosques de pino-encino o bosques de encino-pino, según dominancia (Rwadowsky, 1978). Generalmente se encuentran en la parte norte del estado en los municipios de Totolapan, Tlayacapan, Cuernavaca, Huitzilac, Tlalnepantla y Tepoztlán. Estos bosques tienen una altura variable entre los 10 y 30 m, su distribución abarca desde los 1,500 a los 2,800 m, parecen tener preferencia por los suelos con buen drenaje (CONABIO y UAEM, 2004).

Bosques de Latifoliadas

Estos bosques se encuentran integrados por una amplia diversidad específica del género *Quercus*, estas no solo se distribuyen en zonas templadas, sino también subhúmedas, son comunes en la Faja Volcánica Transmexicana entre los 1,200 y 2,800 msnm (Rwadowsky, 1978).

1.4.2 Bosques de clima tropical

Bosques Tropicales Caducifolios

Estos bosques son característicos de zonas tropicales de clima cálido, generalmente dominados por el género *Bursera*, suelen tener una altura entre 8 y 12 metros, generalmente no superan los 15 m (Rwadowsky, 1978), se encuentran en las faldas bajas de las zonas montañosas, tienen preferencia por suelos bien drenados, se distribuyen por debajo de los 1,500 msnm (Vega *et al.*, 2008).

La principal característica de este tipo de bosque radica en su marcada estacionalidad climática, la cual se caracteriza por presentar una vegetación exuberante en época de lluvias (generalmente de junio a septiembre) y la pérdida del follaje en temporada seca, que generalmente abarca un periodo de 5 a 8 meses (de octubre a mayo). Debido a esta característica son considerados bosques poco “carismáticos”; sin embargo, poseen una alta diversidad y endemismo, estimada en un 25% a nivel de género y un 40% a nivel de especie (Trejo y Hernández, 1997).

Bosques Transicionales

Este tipo de bosques son el resultado del contacto entre los bosques tropicales caducifolios y los bosques de encino, se denominan de acuerdo con su dominancia genérica entre los géneros *Bursera* y *Quercus*. Este tipo de bosques presentan una altura entre los 15 y 25 m, donde el estrato superior es dominado por encinos, suelen tener características propias intermedias de las asociaciones que la conforman. Algunos de estos bosques se mantienen verdes y no pierden su follaje durante la época de secas (Vega *et al.*, 2008).

1.5 Problemática ambiental

Los principales problemas que presenta el Corredor Biológico son pérdida de bosques por la deforestación y/o degradación forestal, debido a que sus coberturas forestales son taladas (legal e ilegalmente) (Figura 7) para dar paso a el cambio de

uso de suelo hacia actividades agrícolas y pecuarias, tan solo en el estado de Morelos el 57.6% de la superficie estatal corresponde a estas actividades (IEFyS, 2014). Aunada a la urbanización de las ciudades cercanas como Cuernavaca y Ciudad de México las cuales ejercen presión sobre el corredor (Batllori, 2001). Otros problemas que presentan son los incendios forestales (CONAFOR, 2018b), cacería furtiva, venta de tierra de monte y roca volcánica además de problemas relacionados con la tenencia de la tierra (FMCN - CONANP, 2009).



Figura 7. Tala clandestina en el Corredor Biológico Chichinautzín. Fuente: Reforma 2016 (disponible en <https://www.reforma.com>).

2. Material

Se utilizó un mosaico de Ortofotos cuya resolución es de 2m/píxel para el año 1994, obtenidas del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI); e imágenes del satélite SPOT 7, con una resolución de 1.5 m/píxel para el año 2017, obtenidas mediante solicitud del Instituto de Geografía a la Estación de Recepción

México ERMEX-SPOT. También fueron descargadas, en formato shapefile (es un formato de representación vectorial, consta de un número variable de archivos, en los que se almacena digitalmente la localización de los elementos geográficos), las Áreas Naturales Protegidas Federales de México, obtenida a través del Geoportal de Conabio (<http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>) y, por último, la información geográfica (formato shapefile) correspondiente a las áreas que se encuentran inscritas en el programa PSAH, obtenida mediante solicitud al Instituto Nacional de Transparencia INAI.

3. Procesamiento de las imágenes

Las imágenes fueron exportadas al Sistema de Información Geográfica (SIG) ArcMap 10.2.2 y proyectadas al sistema de coordenadas WGS 1984 UTM Zona 14N, al transponerlas y compararlas con la extensión Basemap (*World Imagery*) se observó que las ortofotos presentaban un desfase, debido a que este trabajo se basa en la comparación multitemporal de imágenes para la cuantificación de cambios, éstas fueron corregidas para evitar errores y cuantificar falsos cambios asociados a errores geométricos (Mas y Fernández, 2003). La corrección de imágenes fue realizada en el software ERDAS Imagine 9.1, mediante la herramienta *Auto Sync Workstation*, la cual corrige distorsiones geométricas y atmosféricas. La corrección consistió en la georreferenciación de la ortofoto de 1994, utilizando como referencia la imagen Spot del 2017, para la generación automática de puntos de control en las zonas donde se presentó un mayor desfase, con el fin de corregirlo (Hantson *et al.*, 2011).

4. Delimitación

La delimitación de la zona en estudio se realizó en ArcMap 10.2.2, mediante la visualización de la capa correspondiente a las Áreas Naturales Protegidas Federales de México, debido a que la zona abarca tres ANP, fue necesario identificar y seleccionar los polígonos de interés, para generar un archivo (shapefile) nuevo con

solo estos polígonos, posteriormente con la herramienta *Geoprocessing*, en la opción *Dissolve* se eliminaron las divisiones entre ellos, con la finalidad de tener una sola figura que integrará todo el Corredor Biológico Chichinautzín (Figura 8).

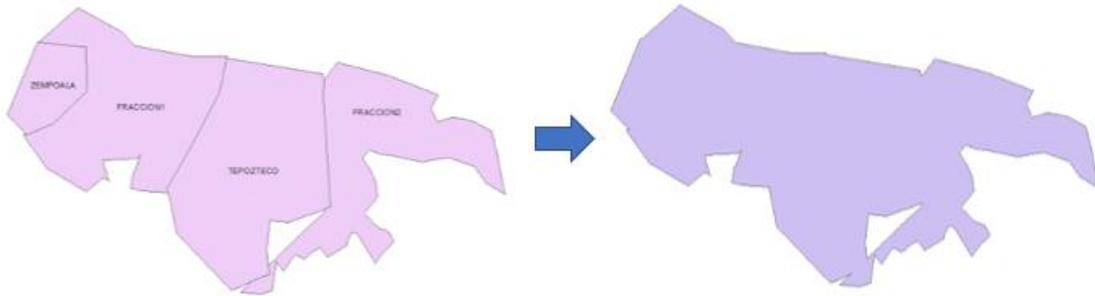


Figura 8. Unión de las ANP que integran el Corredor Biológico Chichinautzín.

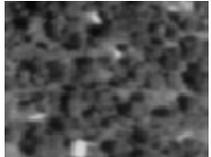
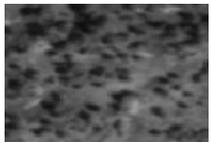
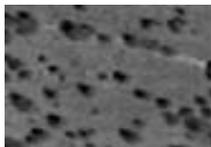
5. Interpretación visual

La interpretación visual consistió en la digitalización, clasificación y etiquetado de las coberturas forestales y categorías no forestales, para ello se tomaron en cuenta elementos de la fotointerpretación como el tamaño, forma, tonalidad, sombra, textura y la relación con otros objetos (Horning, 2004); a escala de 1:5000 para evitar la confusión de árboles con arbustos. Primeramente, se interpretaron las imágenes Spot del año 2017, mediante superpusieron en el SIG junto con el shapefile de la zona en estudio, utilizando la misma proyección cartográfica, posteriormente este archivo se colocó en modo edición y con la herramienta *Cut Polygon Tool*, se digitalizaron manualmente polígonos de las áreas forestales y no forestales o áreas misceláneas.

Una vez obtenida esta primera clasificación, las áreas forestales se clasificaron de acuerdo con la de densidad que ocupa el arbolado, de acuerdo con la clasificación de López-García (2019) (Cuadro 3). Donde la categoría deforestado no es una

cobertura forestal, debido a su mínimo porcentaje de arbolado, sin embargo, es considerado una categoría forestal, que está presente en la zona.

Cuadro 3. Clasificación de categorías forestales, López-García (2019).

| CATEGORIA FORESTAL | DENSIDAD DE ARBOLADO | EJEMPLO |
|-----------------------|---|---|
| Cobertura cerrada | Muy denso, cubre más del 75% de la superficie. |  |
| Cobertura semicerrada | Denso que cubre del 51 al 75% de la superficie. |  |
| Cobertura semiabierta | Menos denso abarca entre el 26 al 50% de la superficie. |  |
| Cobertura abierta | Escaso cubre del 10 al 25% de la superficie. |  |
| Deforestado | Muy escasos, estos no alcanzan a cubrir ni el 10% de la superficie. |  |

Debido a que la zona en estudio presenta dos tipos de condiciones climáticas y por tanto dos tipos de vegetación; se utilizaron los mismos criterios de clasificación de categoría forestal, pero utilizando un etiquetado de acuerdo con el tipo de clima al pertenecen, de acuerdo con la clasificación de vegetación propuesta por Rzedowski (1978). Por un lado, los bosques templados (Cuadro 4) y por el otro los bosques tropicales (Cuadro 5).

Cuadro 4. Etiquetas para categorías templadas.

| ETIQUETA | CATEGORIA | DENSIDAD ARBOLADO |
|-----------------|-----------------------|--------------------------|
| 1 | Cobertura cerrada | >75 |
| 2 | Cobertura semicerrada | 51-75 |
| 3 | Cobertura semiabierta | 26-50 |
| 4 | Cobertura abierta | 10-25 |
| 5 | Deforestado | <10 |
| 6 | No forestal | No aplica |

Cuadro 5. Etiquetas para categorías tropicales.

| ETIQUETA | CATEGORIA | DENSIDAD ARBOLADO |
|-----------------|-----------------------|--------------------------|
| 7 | Cobertura cerrada | >75 |
| 8 | Cobertura semicerrada | 51-75 |
| 9 | Cobertura semiabierta | 26-50 |
| 10 | Cobertura abierta | 10-25 |
| 11 | Deforestado | <10 |
| 12 | Áreas misceláneas | No aplica |

Las áreas no forestales y áreas misceláneas se usaron como sinónimos. Corresponden a zonas donde están ausentes las categorías forestales (es decir no hay presencia de árboles). Estas áreas incluyen zonas urbanas, agrícolas, de pastoreo, y otros tipos de coberturas vegetales como matorrales, pastizales; también incluyen afloramientos rocosos, cuerpos de agua y derrames lávicos recientes.

Finalizada la digitalización y etiquetado de las coberturas correspondientes al año 2017 (Figura 9), se procedió a dar un tratamiento cartográfico y topológico al archivo para corregir errores. Primero se eliminaron los polígonos con áreas menores al área mínima cartografiable de 0.062 ha, para ello fue necesario agregar un nuevo campo en la tabla de atributos con la abreviatura “ha” y con la herramienta *Calculate Geometry*, calcular las superficies en hectáreas que ocupó cada polígono. Los polígonos con áreas menores al área mínima cartografiable fueron unidas a otro polígono vecino mediante la herramienta *eliminate*.

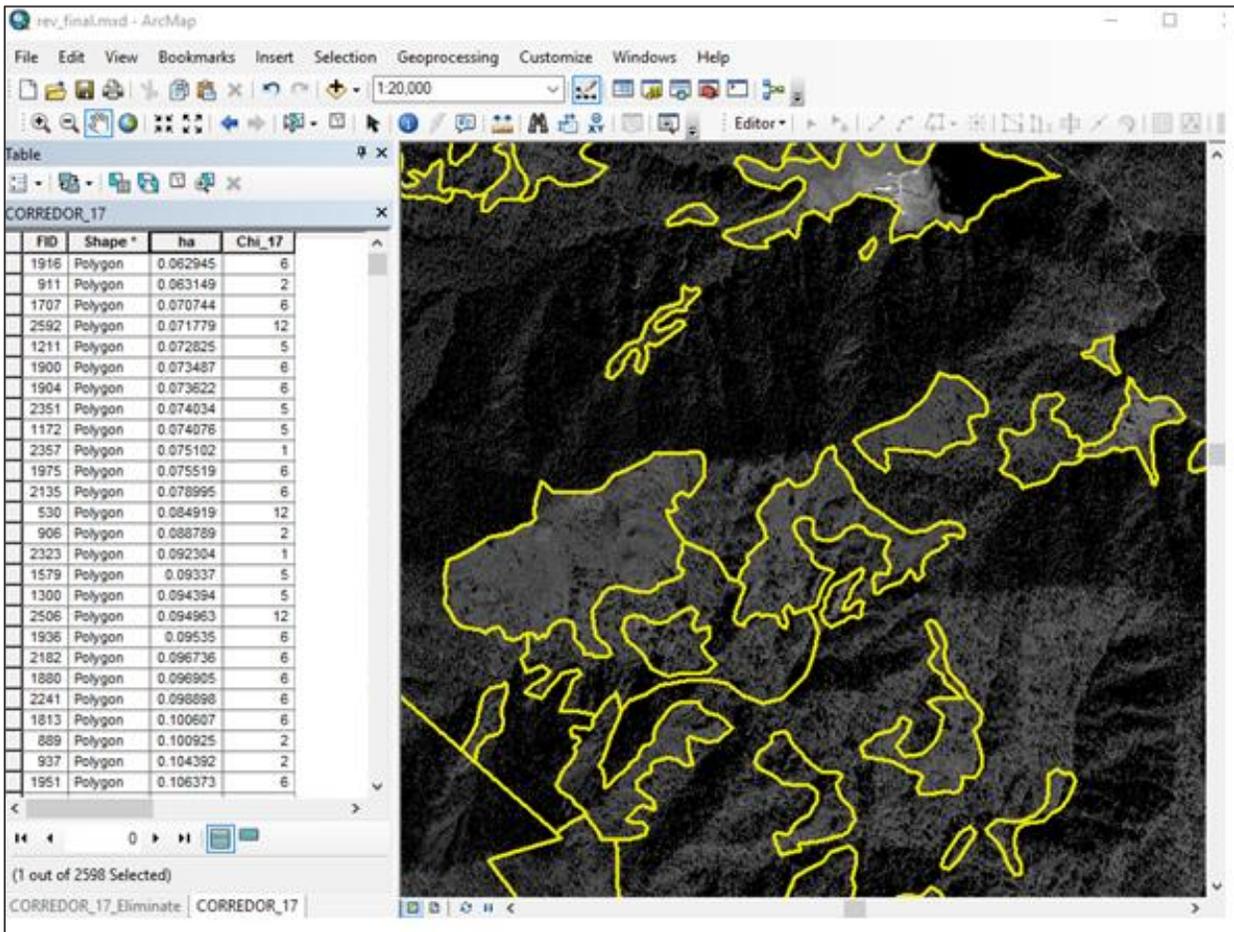


Figura 9. Digitalización y etiquetado de las coberturas forestales de la zona en estudio.

Posteriormente se aplicó un análisis topológico, para descartar errores de superposición de polígonos o espacios vacíos entre ellos, por lo que fue creado un

Personal *Geodatabase* desde *Arc Catalog* donde se creó la topología con las reglas *Must not overlap* y *Must not have gaps*. Una vez corregido el shape resultante fue guardado y se creó una copia.

Para generar el archivo de las coberturas forestales de 1994, se utilizaron las ortofotos, las cuales se sobrepusieron con la copia de coberturas del 2017, a la cual se le agregó un nuevo campo en la tabla de atributos, con el título 1994, éste se utilizó como base para generar uno nuevo con los cambios correspondientes al año 1994.

Los cambios fueron determinados de acuerdo con lo propuesto por López-García (2007; 2019), mediante la comparación visual de ambas imágenes (Spot y Ortofotos) en pantalla, modificando únicamente los polígonos que presentaron un cambio en digitalización o etiquetado; este procedimiento es muy importante debido a que evita cambios erróneos por la diferente digitalización de un mismo polígono (Mas y Fernández, 2003). Una vez digitalizados y etiquetados los cambios, al shape resultante de 1994 se le asignó el mismo tratamiento que al del año 2017, para la corrección de errores. Posteriormente se procedió a calcular las superficies de cada polígono y se identificaron los polígonos cuyas coberturas forestales no cumplieran con el criterio de cobertura forestal de acuerdo a la definición de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, 2000) para la evaluación de los Recursos Forestales Mundiales (FRA), por lo que se “eliminaron” con la herramienta *eliminate* los polígonos de coberturas forestales cuya superficie fuera menor a 0.5 ha, esto se realizó en ambos shapes, conservando superficies menores a 0.5 ha para las superficies “No forestales”.

Una vez con los shapes corregidos la superposición cartográfica de ambos (1994 y 2017) permitió la visualización de cambios entre coberturas, estos cambios fueron visualizados y analizados en el SIG; con la extensión *Spatial Analyst*. Finalmente se unieron ambos archivos mediante la herramienta *Geoprocessing* en la opción unión, con la finalidad de tener un solo archivo con la información de las

coberturas de ambos años. Esta información fue guardada en formato dbf (el cual es un archivo que permite gestionar la base de datos) que es compatible con Excel.

6. Estimación del cambio de coberturas

Para un primer análisis de la superficie forestal se agruparon los datos de las coberturas forestales, cuyo arbolado fuera mayor al 10% (cerrada, semicerrada, semiabierta y abierta), también se agruparon los datos de las categorías no forestales (deforestada, no forestal y áreas misceláneas), consideradas como tales debido a su mínima o nula densidad de arbolado el cual es menor o igual al 10 %.

Posteriormente se generó una matriz de transición con la finalidad de cuantificar los cambios por ganancia, pérdida, persistencia y las trayectorias de cambio entre las coberturas, además de que permitió la identificación de los diferentes procesos que ocurrieron en dichas coberturas (López-García, 2007; López *et al.*, 2015; y López-García, 2019).

En la matriz se identificaron, por debajo de la diagonal gris, en colores verdes los procesos de cambio positivos como la densificación, reforestación y forestación; en la parte superior de la diagonal, se observan los cambios negativos como la degradación, deforestación y el cambio de uso de suelo, que se muestran en color amarillo, naranja y rojo respectivamente. El color gris representa la falta de cambio (Figura 10).

La estimación se realizó a nivel general por tipo de coberturas forestales en toda la zona en estudio y a nivel particular por tipo de clima al que pertenecen las coberturas, debido a que son diferentes asociaciones forestales y cuentan con diferentes atributos.

| Coberturas | | 2017 | | | | | | |
|------------|--------------|---------|-------------|-------------|---------|-------------|-------------|-------|
| | | Cerrada | Semicerrada | Semiabierta | Abierta | Deforestado | No Forestal | Total |
| 1994 | Cerrada | | | | | | | |
| | Semicerrada | | | | | | | |
| | Semiabierta | | | | | | | |
| | Abierta | | | | | | | |
| | Deforestado | | | | | | | |
| | No Forestal | | | | | | | |
| | Total | | | | | | | |

| | | | | | | | |
|---------|---------------|---------------|-------------|----------------------|---------------|---------------|-----------|
| Legenda | Densificación | Reforestación | Forestación | Degradación Forestal | Deforestación | Cambio de uso | No Cambio |
|---------|---------------|---------------|-------------|----------------------|---------------|---------------|-----------|

Figura 10. Matriz de transición utilizada para el análisis de los cambios de la cobertura forestal.

7. Áreas y procesos de cambio

La estimación de áreas de cambio se realizó mediante la agrupación de los tipos de cobertura, de acuerdo con el proceso de transformación que sufrieron. Se distinguieron seis procesos los cuales se detallan a continuación.

Procesos de cambio

- Densificación forestal: Aumento en la densidad del arbolado (incremento en el dosel arbóreo), cuando una cobertura forestal del año 1994 pasa a otra cobertura considerada más alta en 2017.
- Reforestación: Restablecimiento del arbolado, cuando una superficie deforestada es reforestada para ser una cobertura forestal (cerrada, semicerrada, semiabierta o abierta)
- Forestación: Establecimiento de árboles en donde anteriormente no había, el uso de suelo pasa de no forestal a cualquier cobertura forestal.
- Degradación forestal: Pérdida parcial de biomasa o disminución del arbolado. Este proceso no se caracteriza por pérdida de superficie forestal, sino por la disminución en la calidad de éste, cuando una cobertura forestal pasa a una inferior.

- Deforestación: Degradación de la superficie forestal, cuando hay una disminución del arbolado hasta ser <10%
- Cambio de uso de suelo a agrícola o pastizal generalmente: Pérdida de superficie forestal, cuando una cobertura cambia a no forestal.

El no cambió, no se considera un proceso sin embargo se presenta en el área y significa la permanencia de una cobertura o un uso a lo largo del tiempo.

8. Tasa de cambio

La tasa de cambio se calculó de acuerdo con la ecuación propuesta por FAO (1996). Esta tasa expresa el cambio en porcentaje de la superficie y se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$\delta = \left(\frac{S_2}{S_1} \right)^{\frac{1}{n}} - 1$$

Dónde: δ representa la tasa de cambio (para expresar en % se multiplica por 100); S_1 corresponde a la superficie de la cobertura al inicio del período; S_2 la superficie de la cobertura al final del período y n al número de años entre las dos fechas.

9. Comparación de áreas con PSAH

Se comparó mediante la superposición, la información geográfica (en formato shapefile) de las áreas que se encuentran inscritas en el programa Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos y la información generada de los procesos de cambio, con el fin de poder analizar la influencia de dicho programa con respecto al estado de conservación de las coberturas forestales en la zona en estudio.

VII. Resultados

1. Superficie forestal

En el año 1994 la superficie forestal ocupó el 61.9% (39,488 ha) del área total del corredor, estimada para este estudio en 63,801 ha. En el año 2017 la superficie se incrementó al 63.9% (40,764 ha), obteniendo un aumento del 2% equivalente a 1,276 ha (Figura 11).

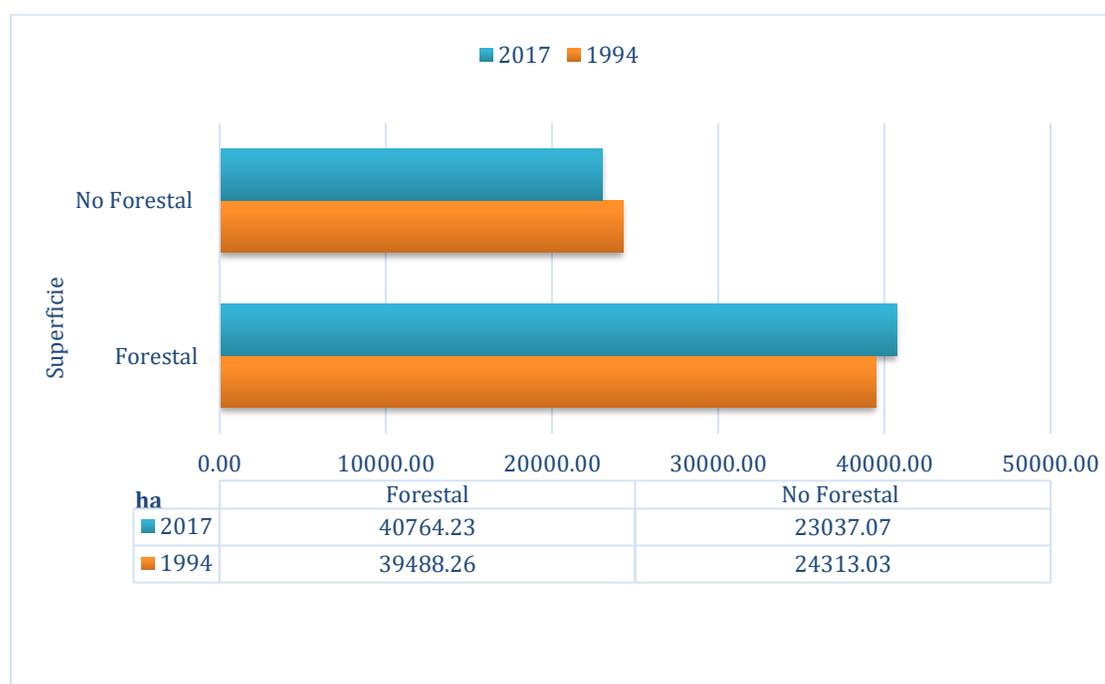


Figura 11. Gráfica de superficies forestales y no forestales periodo 1994-2017.

En la siguiente figura se muestra la distribución de las superficies dentro del corredor, en color verde se muestran las superficies forestales, mientras que las áreas amarillas corresponden a las no forestales (Figura 12).

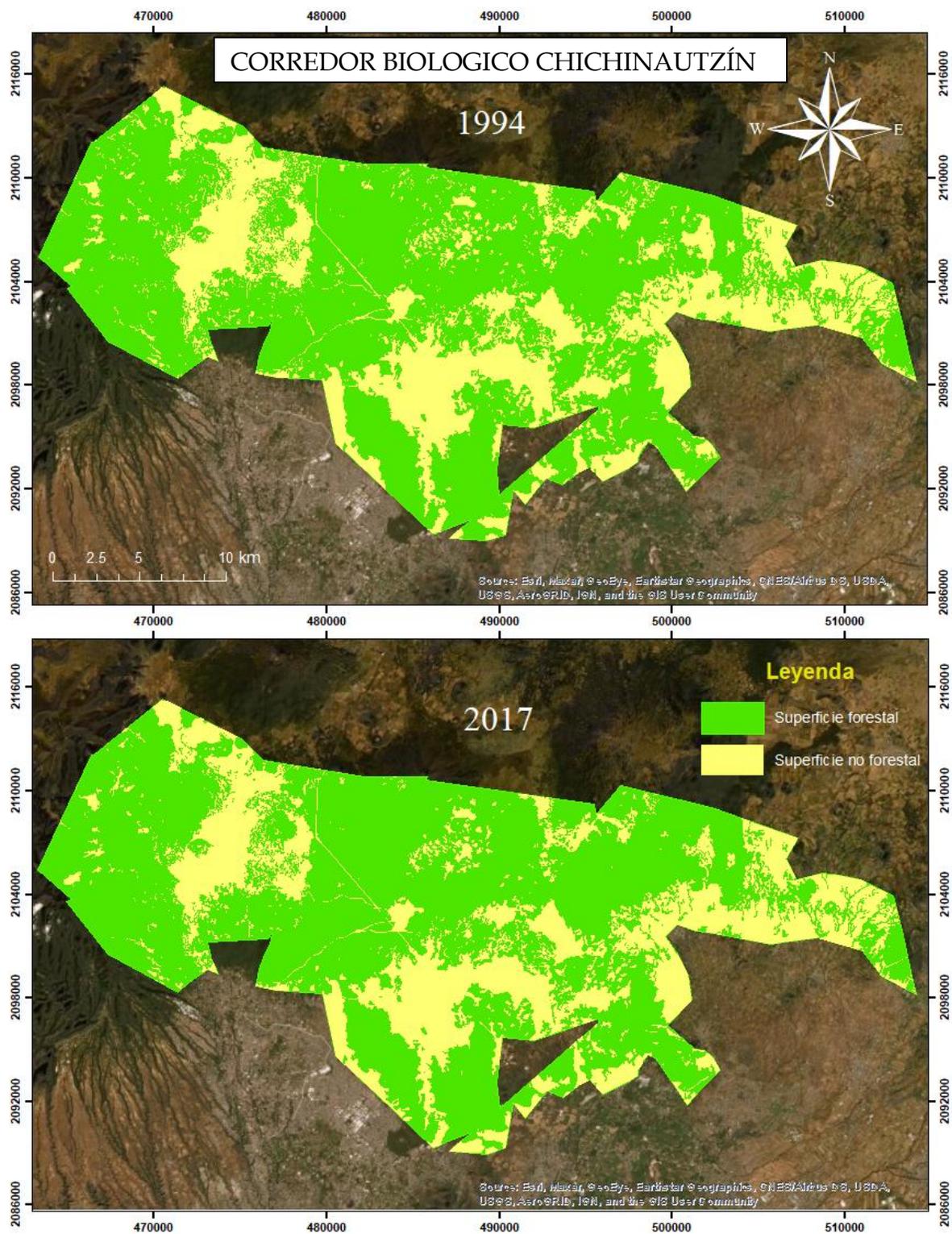


Figura 12. Comparación de la superficie forestal y no forestal en 1994 2017.

La distinción de coberturas forestales de acuerdo con su afinidad climática, indico que en 1994 la cubierta forestal se encontraba conformada en un 43.3% por coberturas de clima templado (bosques de pino, bosques de oyamel, bosques de encino-pino y bosques de encino) y en un 18.6% por coberturas de clima tropical (bosques tropicales caducifolios y el transicional entre bosques de encino-bosques tropicales caducifolios), el porcentaje restante perteneció a la categoría no forestal. Para el año 2017 las coberturas de clima templado siguieron predominando en el área en estudio, ocupando el 45.2%, mientras que las de clima tropical abarcaron el 18.7%. El aumento en la superficie forestal se debió principalmente al incremento de la vegetación de clima templado, las cuales aumentaron un 1.9% (1,211 ha) en el 2017 respecto a 1994, en comparación con las de clima tropical, las cuales aumentaron 0.1% (65 ha) en el mismo periodo (Cuadro 6).

Cuadro 6. Comparación de superficies periodo 1994-2017.

| Superficie | 1994 | | 2017 | | Diferencia | |
|-----------------------|---------------|-------------|---------------|-------------|--------------|------------|
| | ha | % | ha | % | ha | % |
| Forestal Templado | 27,620 | 43.3 | 28,831 | 45.2 | 1,211 | 1.9 |
| Forestal Tropical | 11,868 | 18.6 | 11,933 | 18.7 | 65 | 0.1 |
| Total Forestal | 39,488 | 61.9 | 40,764 | 63.9 | 1,276 | 2.0 |
| No Forestal | 24,313 | 38.2 | 23,037 | 36.2 | -1,276 | -2.0 |
| Total | 63,801 | 100 | 63,801 | 100 | | |

2. Coberturas forestales

La interpretación visual permitió clasificar los tipos de bosque en función de la densidad del arbolado, esta clasificación indicó que la cobertura forestal del corredor incrementó 2%. Este incremento se presentó particularmente en la cobertura cerrada, la cual registró un aumento de 8,760 ha, mientras que las demás coberturas registraron pérdidas, incluso las categorías deforestado y no forestal. Las disminuciones más considerables en cuanto a superficie se presentaron en la cobertura semiabierta con 4,475 ha y semicerrada con 2,315 ha menos. Las categorías deforestado y no forestal también registraron pérdidas, estas fueron de 642 ha y 634 ha respectivamente (Cuadro 7 y figura 13).

Cuadro 7. Superficie por categoría forestal y diferencias, periodo 1994-2017.

| Categoría forestal | 1994 | | 2017 | | Diferencia | |
|-----------------------|--------|------|--------|------|------------|------|
| | ha | % | ha | % | ha | % |
| Cobertura cerrada | 20,423 | 32.0 | 29,183 | 45.7 | 8,760 | 13.7 |
| Cobertura semicerrada | 9,252 | 14.5 | 6,937 | 10.7 | -2,315 | -3.6 |
| Cobertura semiabierta | 7,127 | 11.2 | 2,652 | 4.2 | -4,475 | -7 |
| Cobertura abierta | 2,686 | 4.2 | 1,992 | 3.1 | -694 | -1.1 |
| Deforestado | 3,656 | 5.7 | 3,014 | 4.7 | -642 | -1.0 |
| No Forestal | 20,657 | 32.4 | 20,023 | 31.4 | -634 | -1.0 |
| Total | 63,801 | 100 | 63,801 | 100 | | |

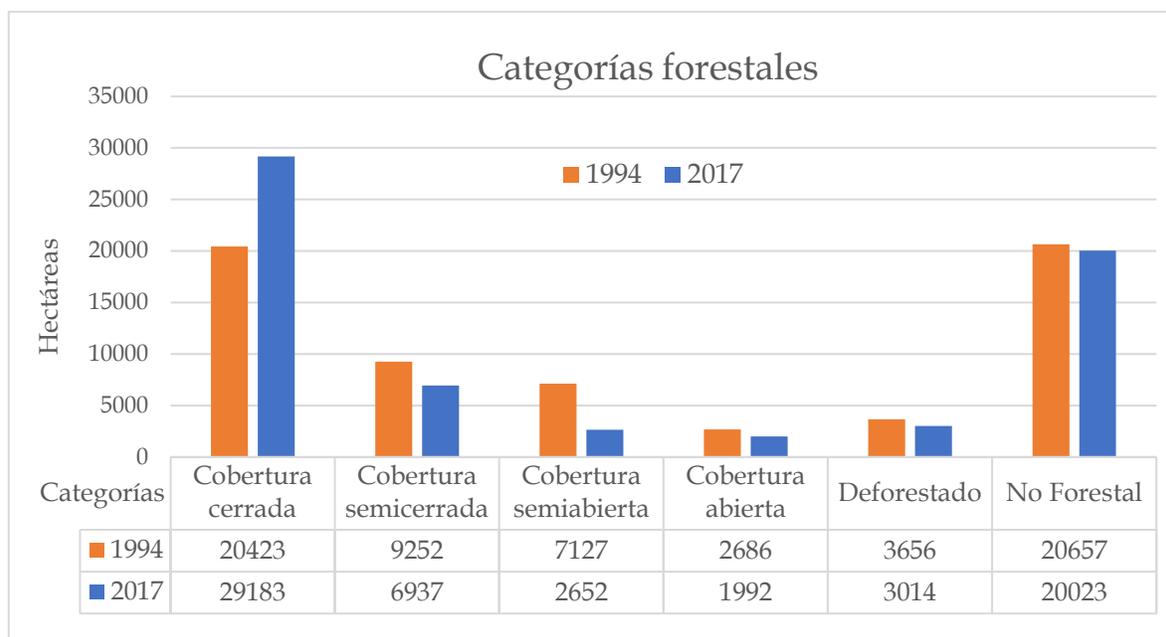


Figura 13. Gráfica de superficies por categoría forestal periodo 1994-2017.

2.1 Coberturas forestales templadas

En las coberturas templadas se presentó una tendencia similar a la general, donde se registró un aumento en la cobertura cerrada del 12.9%, llegando a ocupar el 33.6% de la zona en estudio durante 2017; por otro lado, las demás coberturas registraron pérdidas, las más considerables fueron en la semiabierta que perdió 4,303 ha equivalente al 6.8%, seguida de la semicerrada con 1,884 ha. La categoría deforestado presentó una disminución en la superficie del 0.1% (102 ha), mientras que la no forestal disminuyó el 1.7% (1,108 ha) (Cuadro 8 y Figura 14).

Cuadro 8. Categorías forestales templadas, superficies y diferencias.

| Categoría forestal | 1994 | | 2017 | | Diferencia | |
|-----------------------|--------|------|--------|------|------------|------|
| | ha | % | ha | % | ha | % |
| Cobertura cerrada | 13,198 | 20.7 | 21,441 | 33.6 | 8,242 | 12.9 |
| Cobertura semicerrada | 6,379 | 10 | 4,495 | 7.1 | -1,884 | -2.9 |
| Cobertura semiabierta | 6,498 | 10.1 | 2,195 | 3.4 | -4,303 | -6.7 |
| Cobertura abierta | 1,544 | 2.4 | 701 | 1.0 | -844 | -0.9 |
| Deforestado | 2,449 | 3.8 | 2,345 | 3.7 | -102 | -0.1 |
| No forestal | 8,873 | 13.9 | 7,764 | 12.2 | -1,108 | -1.7 |
| Total | 38,941 | 61.0 | 38,941 | 61.1 | | |

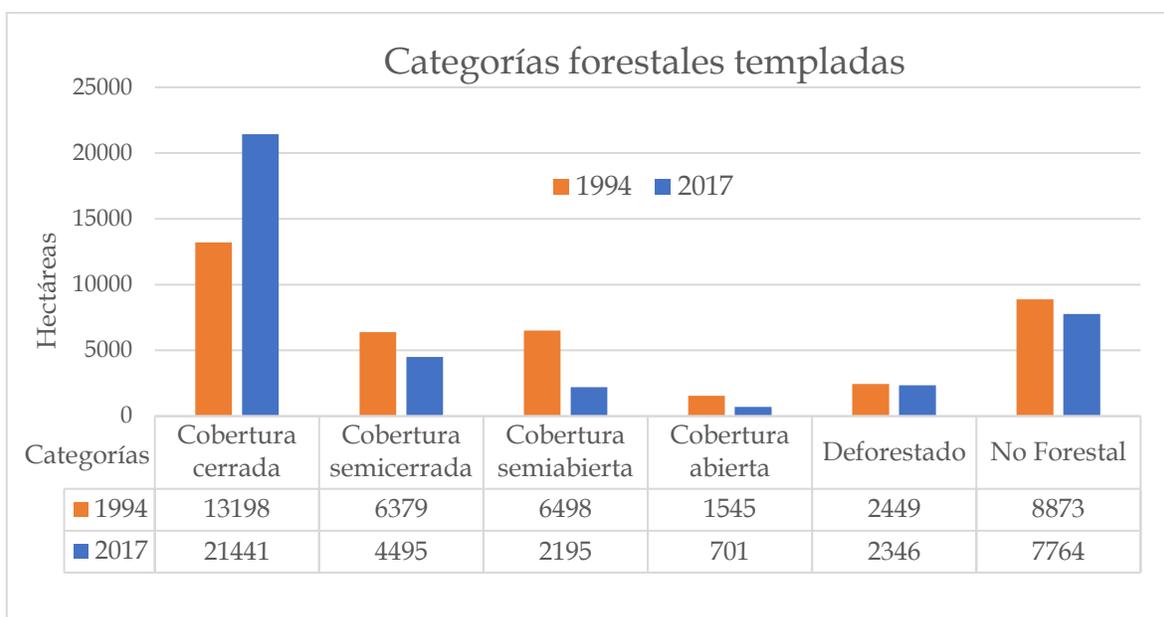


Figura 14. Gráfica de superficies para categorías forestales templadas.

2.2 Coberturas forestales tropicales

Durante el primer año las coberturas tropicales ocuparon el 18.6% y se observaron integradas en su mayoría por la cobertura cerrada, la cual abarcó 7,225 ha (11.3%), le siguió la semicerrada con 2,874 ha (4.5%), la abierta con 1,141 ha (1.8%), y la semiabierta con 629 ha (1%).

Durante el 2017 estos datos se modificaron, debido a que se registraron aumentos en superficie de las coberturas cerrada y abierta, este aumento fue de 518 ha (0.8%) y 151 ha (0.2%), respetivamente. Las pérdidas más considerables en superficie fueron en la cobertura semicerrada con 431 ha y semiabierta con 172 ha (Cuadro 9 y Figura 15). La categoría no forestal registró un incremento de 474 ha (1.7%) y la desforestado una pérdida de 540 ha.

Cuadro 9. Categorías forestales tropicales, superficies y diferencias.

| Categoría forestal | 1994 | | 2017 | | Diferencia | |
|-----------------------|--------|------|--------|------|------------|------|
| | ha | % | ha | % | ha | % |
| Cobertura cerrada | 7,225 | 11.3 | 7,742 | 12.1 | 518 | 0.8 |
| Cobertura semicerrada | 2,874 | 4.5 | 2,442 | 3.8 | -431 | -0.7 |
| Cobertura semiabierta | 629 | 1 | 457 | 0.7 | -172 | -0.3 |
| Cobertura abierta | 1,141 | 1.8 | 1,292 | 2.0 | 151 | 0.2 |
| Deforestado | 1,208 | 1.9 | 668 | 1.1 | -540 | -0.9 |
| No Forestal | 11,784 | 18.5 | 12,259 | 19.2 | 474 | 0.7 |
| Total | 24,860 | 39 | 24,860 | 39 | | |

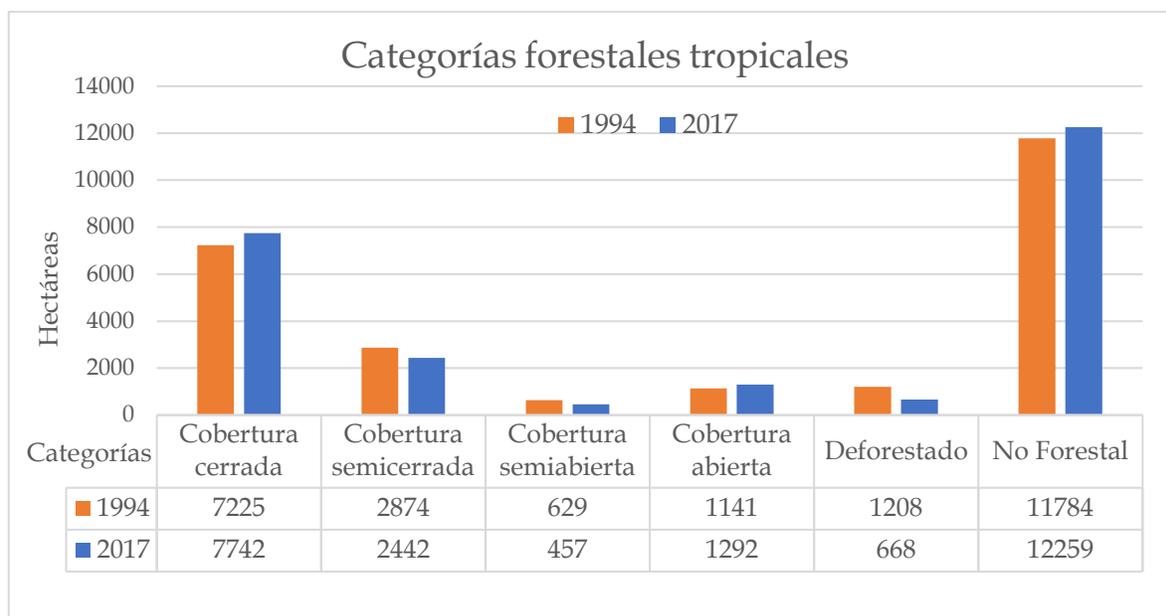


Figura 15. Grafica de superficies para categorías forestales tropicales.

A continuación, se muestran las siguientes figuras que representan la densidad de las coberturas forestales en los años 1994 (Figura 16) y 2017 (Figura 17). Las áreas verdes representan las coberturas de clima templado, mientras que las de clima tropical se muestran en tonos naranjas; las áreas rosas corresponden a la categoría deforestado, mientras que las áreas en color amarillo tenue representan las áreas con usos no forestales. Para el caso de las áreas de clima templado las áreas no forestales incluyeron mayormente zonas agrícolas, de pastoreo, derrames lávicos recientes, cuerpos de agua y zonas urbanas; mientras que en el clima tropical las áreas misceláneas correspondieron mayormente a otros tipos de coberturas vegetales como matorrales, afloramientos rocosos; aunque también incluye áreas agrícolas y urbanas.

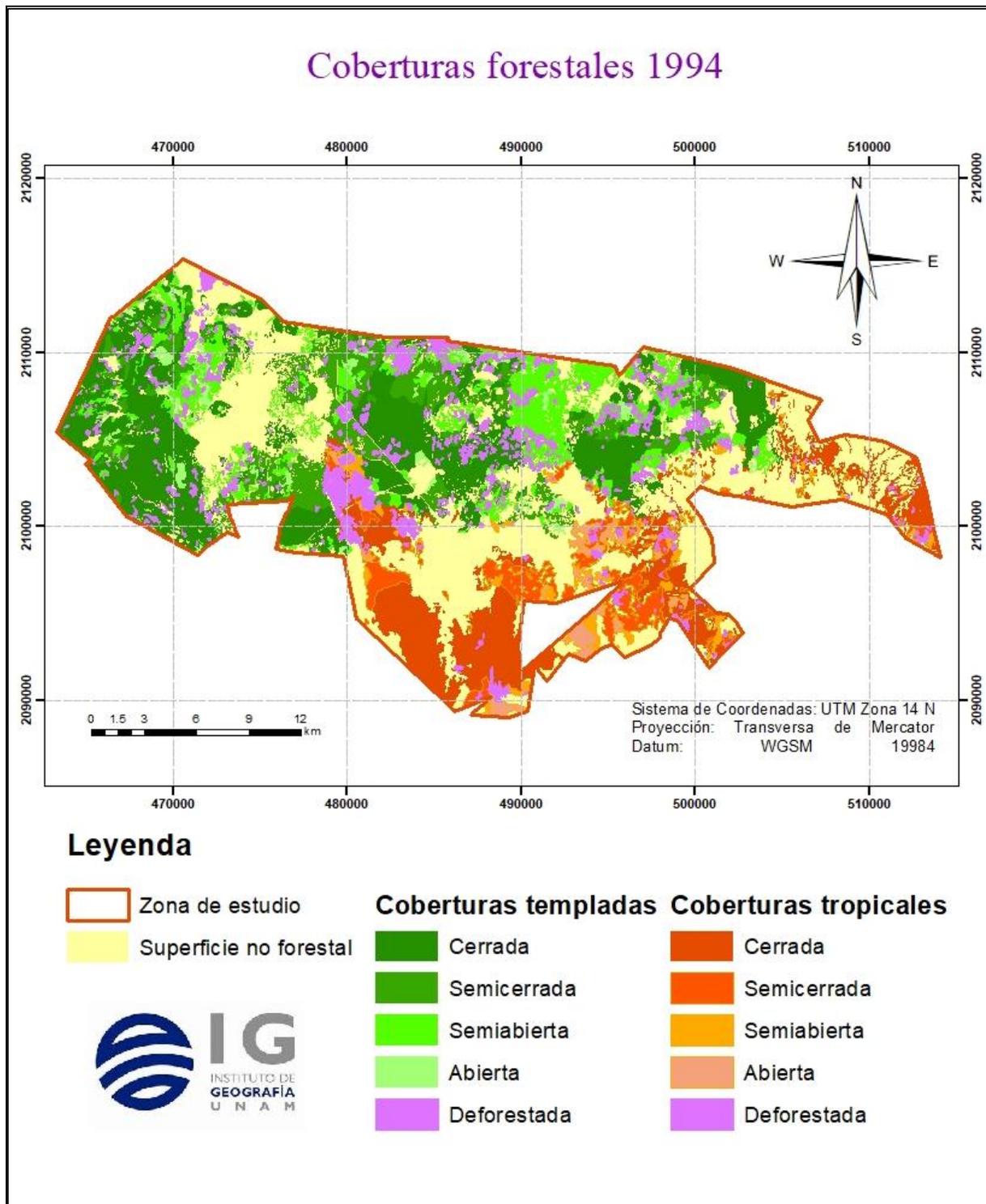


Figura 16. Mapa de coberturas forestales 1994.

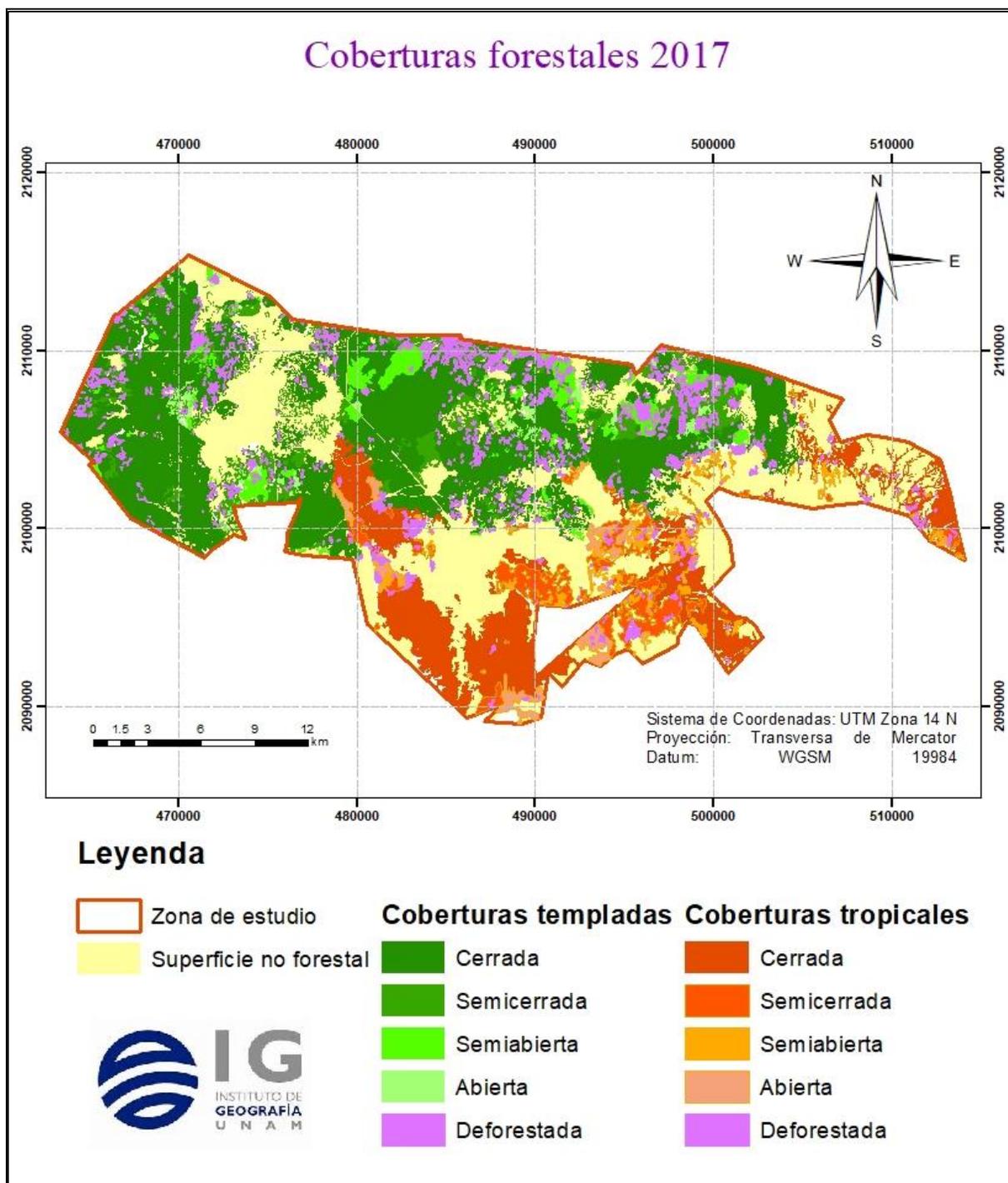


Figura 17. Mapa de coberturas forestales 2017.

3. Estimación y procesos de cambio

El análisis bitemporal permitió obtener matrices de transición, estas matrices indican que durante el periodo 1994-2017, 19,620 ha dentro del corredor biológico presentaron algún proceso de cambio, esta área representa el 30.8% de la zona en estudio.

En la matriz se puede distinguir por debajo de la diagonal gris, los procesos de cambio positivos que generan recuperación en la cubierta forestal. Entre ellos, la densificación fue el proceso dominante, mediante el cual aumentaron el dosel arbóreo 11,583 ha. Las coberturas beneficiadas por este proceso fueron semicerrada y semiabierta, juntas sumaron 8,022 ha. Por otro lado, mediante la reforestación se recuperaron 2,311 ha, donde el cambio más relevante se registró de la categoría deforestado a cobertura cerrada, transformando 976 ha. La forestación fue el proceso que menos se registró, modificando 1,583 ha, de las cuales 620 ha corresponden a un cambio de clase no forestal (0% de arbolado) a deforestado (1<10%).

Los procesos de cambio negativos que generan perturbaciones se ubican por encima de la diagonal, entre éstos el cambio más preocupante, debido a que implica una pérdida total de la cubierta forestal, es el cambio de uso de suelo, este proceso transformo 950 ha, las coberturas más afectadas fueron abierta con 226 ha y cerrada con 216 ha. Mientras tanto, la degradación forestal cambio 1,905 ha, de las cuales 617 ha cambiaron de cobertura cerrada a semicerrada. Con la deforestación se perdieron 1,253 ha, donde la cobertura más afectada fue la semiabierta con una pérdida de 481 ha (Cuadro 10).

En cuanto a la agrupación de acuerdo con el proceso de transformación, se encontró que de las 19,620 ha que fueron modificadas, el 78.9% (15,477 ha) cambió por un proceso positivo de recuperación, mientras que el 21.1% (4,143 ha) fue afectado por un proceso negativo de alteración. Por tanto, los procesos positivos superaron a los de negativos, con una diferencia porcentual del 57.8% equivalente a

11,333 ha. Entre estos procesos la densificación fue la que más frecuente, transformando el 59% (11,583 ha); en comparación con la degradación forestal, la cual afectó al 9.9% (1,941 ha) (Cuadro 11.)

Cuadro 10. Matriz de transición general periodo 1994-2017.

| Categorías | | 2017 | | | | | | Total 1994 |
|------------|-------------------|---------|-------------|-------------|---------|-------------|-------------|---------------|
| | | Cerrada | Semicerrada | Semiabierta | Abierta | Deforestado | No Forestal | |
| 1994 | Cerrada | 19,146 | 617 | 187 | 94 | 164 | 216 | 20,423 |
| | Semicerrada | 5,034 | 3,039 | 426 | 292 | 263 | 199 | 9,252 |
| | Semiabierta | 2,988 | 2,163 | 1,065 | 326 | 481 | 104 | 7,127 |
| | Abierta | 696 | 413 | 288 | 718 | 346 | 226 | 2,686 |
| | Deforestado | 976 | 425 | 451 | 458 | 1,141 | 204 | 3,656 |
| | No Forestal | 342 | 280 | 236 | 105 | 620 | 19,074 | 20,657 |
| | Total 2017 | 29,183 | 6,937 | 2,652 | 1,992 | 3,014 | 20,023 | 63,801 |

| | | | | | | | |
|---------|---------------|---------------|-------------|----------------------|---------------|------------------------|-----------|
| Leyenda | Densificación | Reforestación | Forestación | Degradación Forestal | Deforestación | Cambio de uso de suelo | No Cambio |
|---------|---------------|---------------|-------------|----------------------|---------------|------------------------|-----------|

Cuadro 11. Procesos de cambio (los porcentajes están expresados respecto al área total afectada por cambios).

| Procesos de cambio | | Hectáreas (ha) | Total (ha) | Porcentaje (%) | Total (%) | Diferencia (ha) | Diferencia (%) |
|--------------------|------------------------|----------------|------------|----------------|-----------|-----------------|----------------|
| Positivos | Densificación forestal | 11,583 | 15,477 | 59.0 | 78.9 | 11,333 | 57.8 |
| | Reforestación | 2,311 | | 11.7 | | | |
| | Forestación | 1,583 | | 8.1 | | | |
| Negativos | Degradación forestal | 1,941 | 4,143 | 9.9 | 21.1 | | |
| | Deforestación | 1,253 | | 6.4 | | | |
| | Cambio de uso de suelo | 950 | | 4.8 | | | |
| Total afectado | | 19,620 | 19,620 | 100 | | | |
| Superficie total | | 63801 | | | | | |

3.1 Estimación de cambio en coberturas templadas

Del 30.8% de la zona en estudio que fue afectada por un proceso, el 25.2% (16,082 ha) corresponde a las categorías de clima templado, cuya área se estimó en 38,941 ha. Entre los procesos positivos, el dominante fue la densificación con 10,700 ha, entre estos 4,706 ha pertenecían a cobertura semicerrada y 2,879 a semiabierta, que se densificaron a cerrada. Le siguió la reforestación con 1,463 ha, de las cuales 619 ha deforestadas se convirtieron a coberturas cerradas. Mediante la forestación, se incrementaron 1,413 ha, de éstas 598 ha de categoría no forestal se transformaron a deforestado.

La degradación forestal fue el proceso de perturbación dominante en esta área, mediante el cual 1,319 ha bajaron de categoría, el cambio más considerable se presentó en 540 ha de cobertura cerrada, que pasaron a semicerrada. Le siguió la deforestación, afectando a 882 ha, donde 402 ha pertenecían a la cobertura semiabierta y 243 ha a abierta. El cambio de uso de suelo modificó 305 ha (Cuadro 12).

En cuanto a procesos el 82% (16,082 ha) de los cambios se presentó en categorías de clima templado, donde la recuperación supero con una diferencia porcentual del 56.4% a las alteraciones; el proceso positivo que más se presento fue la densificación, la cual incremento el dosel arbóreo de 10,700 ha de bosque aportando el 54.5% del área modificada. Los procesos negativos se vieron representadas por la degradación forestal que disminuyo el dosel de 882 ha (Cuadro 13)

Cuadro 12. Matriz de transición para coberturas templadas.

| Categorías | | 2 0 1 7 | | | | | | Total 1994 |
|------------|-------------------|---------------|--------------|--------------|------------|-------------|--------------|---------------|
| | | Cerrada | Semicerrada | Semiabierta | Abierta | Deforestado | No forestal | |
| 1994 | Cerrada | 12,349 | 540 | 128 | 45 | 108 | 28 | 13,198 |
| | Semicerrada | 4,706 | 1,122 | 301 | 70 | 129 | 51 | 6,379 |
| | Semiabierta | 2,879 | 1,972 | 954 | 235 | 402 | 57 | 6,498 |
| | Abierta | 602 | 305 | 238 | 109 | 243 | 48 | 1,545 |
| | Deforestado | 619 | 293 | 387 | 164 | 865 | 120 | 2,449 |
| | No forestal | 286 | 263 | 187 | 79 | 598 | 7,460 | 8,873 |
| | Total 2017 | 21,441 | 4,495 | 2,195 | 701 | 2346 | 7,764 | 38,941 |

| | | | | | | | |
|---------|---------------|---------------|-------------|----------------------|---------------|------------------------|-----------|
| Leyenda | Densificación | Reforestación | Forestación | Degradación Forestal | Deforestación | Cambio de uso de suelo | No Cambio |
|---------|---------------|---------------|-------------|----------------------|---------------|------------------------|-----------|

Cuadro 13. Procesos de cambio para coberturas templadas (los porcentajes están expresados respecto al área total afectada).

| Procesos de cambio | | Hectáreas (ha) | Total (ha) | Porcentaje (%) | Total (%) | Diferencia (ha) | Diferencia (%) |
|--------------------|------------------------|----------------|------------|----------------|-----------|-----------------|----------------|
| Positivos | Densificación forestal | 10,700 | 13,576 | 54.5 | 69.2 | 11,070 | 56.4 |
| | Reforestación | 1,463 | | 7.5 | | | |
| | Forestación | 1,413 | | 7.2 | | | |
| Negativos | Degradación forestal | 1,319 | 2,506 | 6.7 | 12.8 | | |
| | Deforestación | 882 | | 4.5 | | | |
| | Cambio de uso de suelo | 305 | | 1.6 | | | |
| Total afectado | | 16,082 | 16,082 | 82 | | | |
| Total templado | | 38,942 | | | | | |

3.2 Estimación de cambio en coberturas tropicales

Las coberturas tropicales presentaron cambios en 3,538 ha, 1,900 ha presentaron cambios positivos y 1,638 ha cambios negativos.

El mayor cambio positivo se registró en la cobertura semicerrada con 329 ha que se densificaron a cobertura cerrada, mientras la reforestación beneficio a 884 ha, donde 357 ha pertenecían a categoría deforestado que cambiaron a cobertura cerrada, por otro lado, mediante la forestación 56 y 49 ha de áreas no forestales pasaron a cobertura cerrada y semiabierta respectivamente.

El mayor cambio negativo que se presentó fue el cambio del uso del suelo, las pérdidas más importantes fueron 188 ha de cobertura cerrada, 178 ha de cobertura abierta y 148 ha de semicerrada. Por otro lado, la deforestación disminuyó 371 ha. (Cuadro 14).

Los procesos de cambio que indican recuperación dominaron sobre la perturbación; sin embargo, en esta zona no fueron tan marcados, un ejemplo de ello es que los procesos positivos superaron con apenas 263 ha a los negativos. Los procesos de recuperación más frecuentes fueron la reforestación y densificación, con 882 ha y 848 ha, respectivamente. En cuanto a procesos de perturbación, el cambio de uso de suelo dominó con 645 ha (3.3%), seguido de la degradación con 622 ha (3.2%) y la deforestación con 371 ha (Cuadro 15).

Cuadro 14. Matriz de transición para coberturas tropicales.

| Categorías | | 2017 | | | | | | Total 1994 |
|------------|-------------------|--------------|--------------|-------------|--------------|-------------|---------------|---------------|
| | | Cerrada | Semicerrada | Semiabierta | Abierta | Deforestado | No forestal | |
| 1994 | Cerrada | 6,797 | 77 | 59 | 49 | 55 | 188 | 7,225 |
| | Semicerrada | 329 | 1,917 | 125 | 222 | 134 | 148 | 2,874 |
| | Semiabierta | 110 | 192 | 110 | 91 | 79 | 47 | 629 |
| | Abierta | 95 | 108 | 50 | 609 | 102 | 178 | 1,141 |
| | Deforestado | 357 | 132 | 64 | 295 | 275 | 84 | 1,208 |
| | No forestal | 56 | 17 | 49 | 26 | 22 | 11,614 | 11,784 |
| | Total 2017 | 7,742 | 2,442 | 457 | 1,292 | 668 | 12,259 | 24,860 |

| | | | | | | | |
|---------|---------------|---------------|-------------|----------------------|---------------|------------------------|-----------|
| Leyenda | Densificación | Reforestación | Forestación | Degradación Forestal | Deforestación | Cambio de uso de suelo | No Cambio |
|---------|---------------|---------------|-------------|----------------------|---------------|------------------------|-----------|

Cuadro 15. Procesos de cambio para coberturas tropicales (los porcentajes están expresados respecto al área total afectada).

| | Procesos de cambio | Hectáreas (ha) | Total (ha) | Porcentaje (%) | Total (%) | Diferencia (ha) | Diferencia (%) |
|-----------|------------------------|----------------|------------|----------------|-----------|-----------------|----------------|
| Positivos | Densificación | 882 | 1,900 | 4.5 | 9.7 | 263 | 1.3 |
| | Reforestación | 848 | | 4.3 | | | |
| | Forestación | 170 | | 0.9 | | | |
| Negativos | Degradación forestal | 622 | 1,638 | 3.2 | 8.3 | | |
| | Deforestación | 371 | | 1.9 | | | |
| | Cambio de uso de suelo | 645 | | 3.3 | | | |
| | Total afectado | 3,538 | 3,538 | 18 | | | |
| | Sup. Total tropical | 24,859 | | | | | |

4. Áreas de cambio

A continuación, se presentan las áreas que sufrieron un proceso de cambio, en tonos verdes se muestran los positivos que evidencian una recuperación y en tonos cálidos los que evidencian una perturbación negativa (Figura 18).

En la figura 19, se presenta un acercamiento de la parte central del corredor donde se observan grandes áreas forestales que se densificaron; también se observan áreas de menor tamaño en proceso de degradación (áreas amarillas). Mientras que la figura 20 corresponde a la parte sureste, donde se observan numerosas áreas en proceso de degradación y áreas con cambio de uso de suelo.

Áreas de cambio

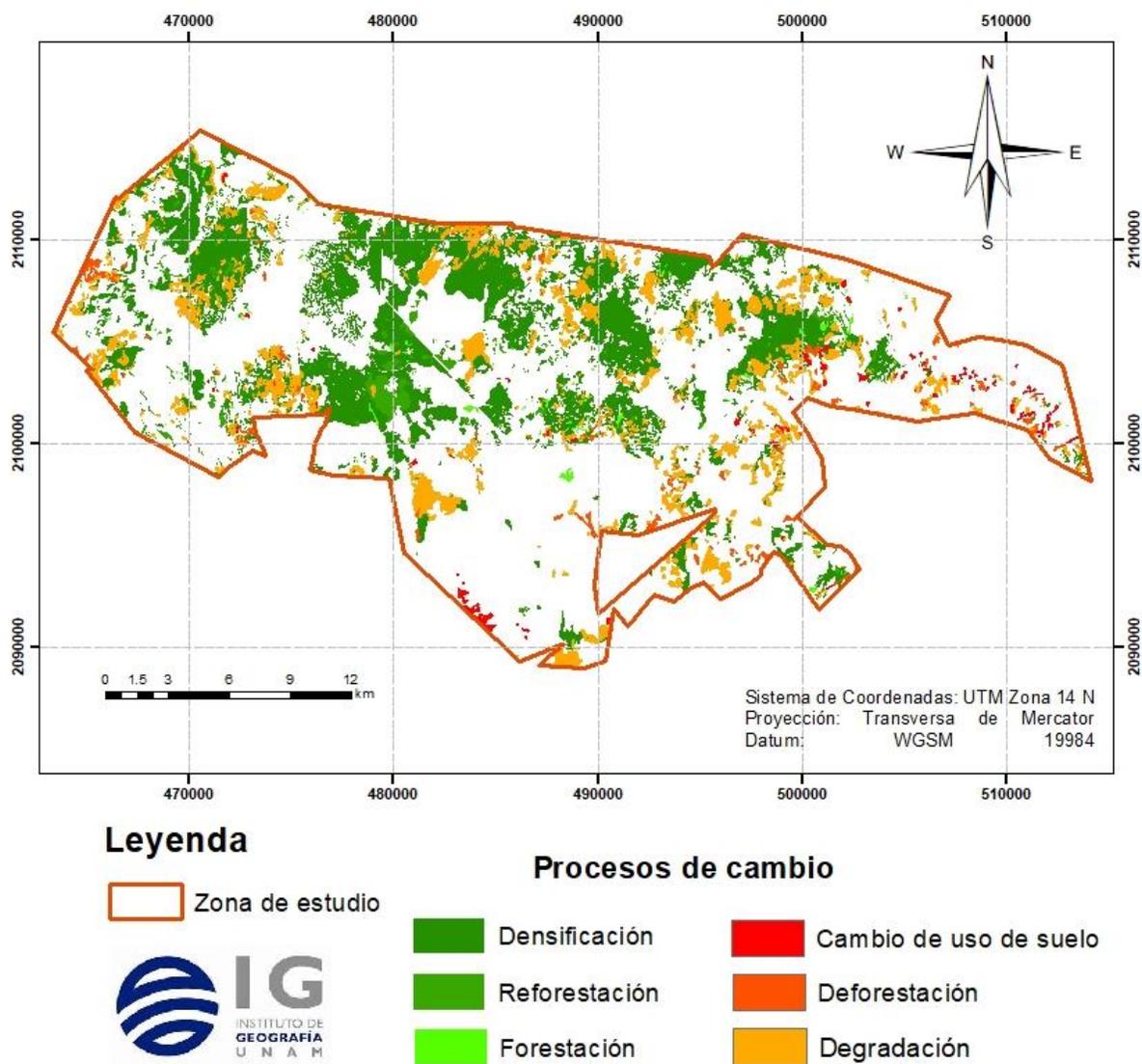


Figura 18. Mapa de áreas y procesos de cambio periodo 1994-2017.

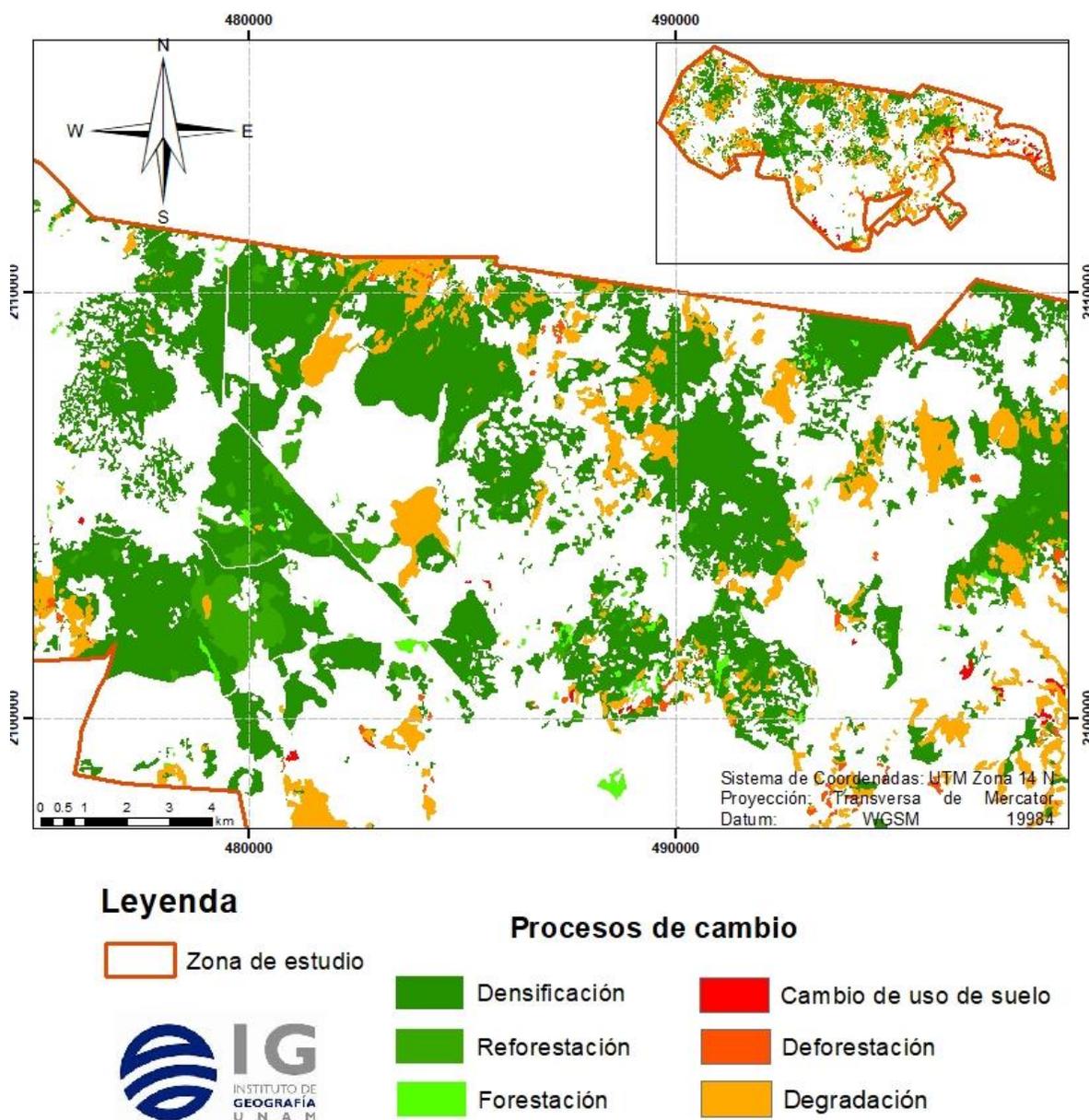


Figura 19. Áreas y procesos de cambio positivos.

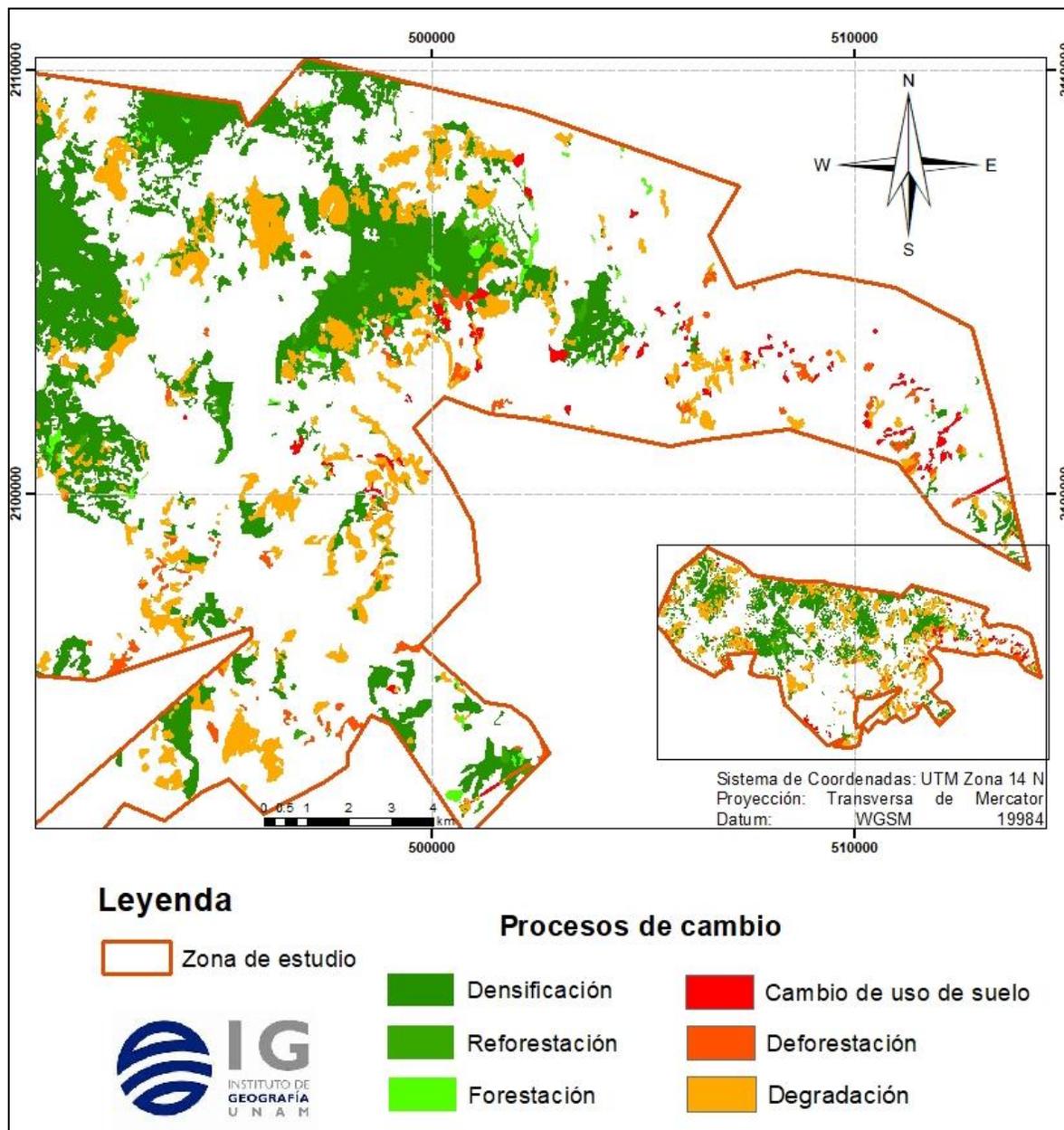


Figura 20. áreas y procesos de cambio negativos.

4.1 Áreas con recuperación

La densificación fue el proceso que más se presentó, transformando 11,583 ha. La figura 21 muestra un ejemplo de áreas transformadas por este proceso, en la primera imagen se observan grandes extensiones de bosque clasificado y etiquetado como cobertura semicerrada (2) y semiabierto (3), mismos que para el año 2017 aumentaron su dosel arbóreo a cobertura cerrada (1) y semicerrada (2) respectivamente.

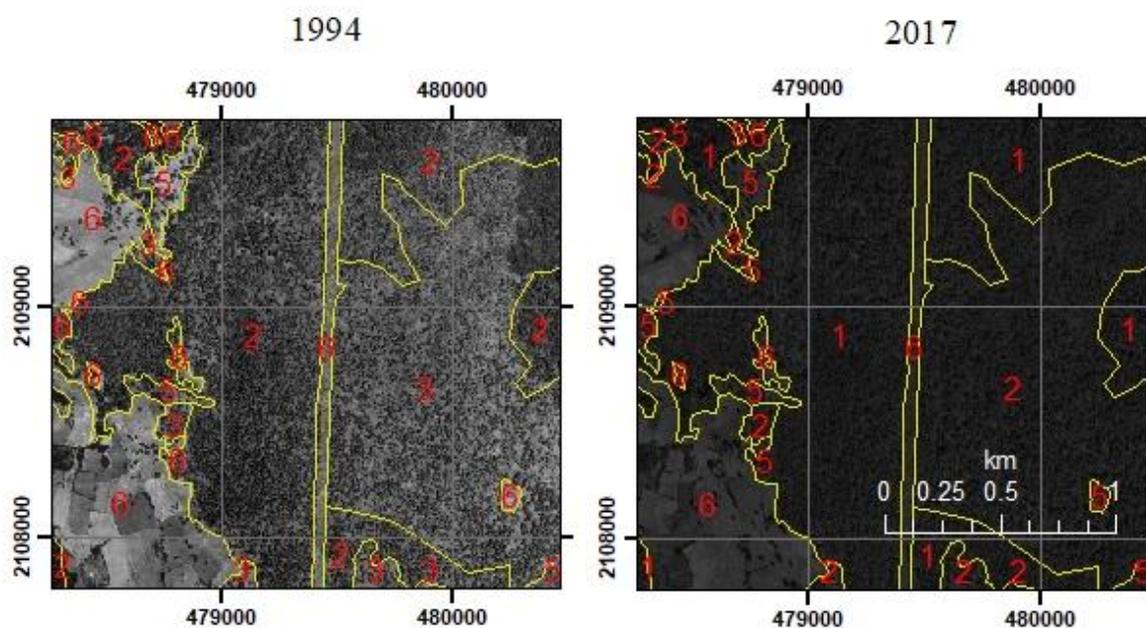


Figura 21. Recuperación por densificación. En el lado izquierdo se encuentra la ortofoto de 1994 y a la derecha se encuentra la imagen Spot del 2017.

Un ejemplo de recuperación por reforestación se muestra en la figura 22, en la primera imagen se observan dos áreas clasificadas como deforestado (5); mismas que adquirieron una cubierta forestal, llegando incluso a cobertura cerrada (1) y semiabierto (3). La figura 23 muestra un ejemplo de forestación, donde se pueden observar superficies con un uso agrícola, que se transformaron a coberturas forestales con un arbolado mayor al 10%.

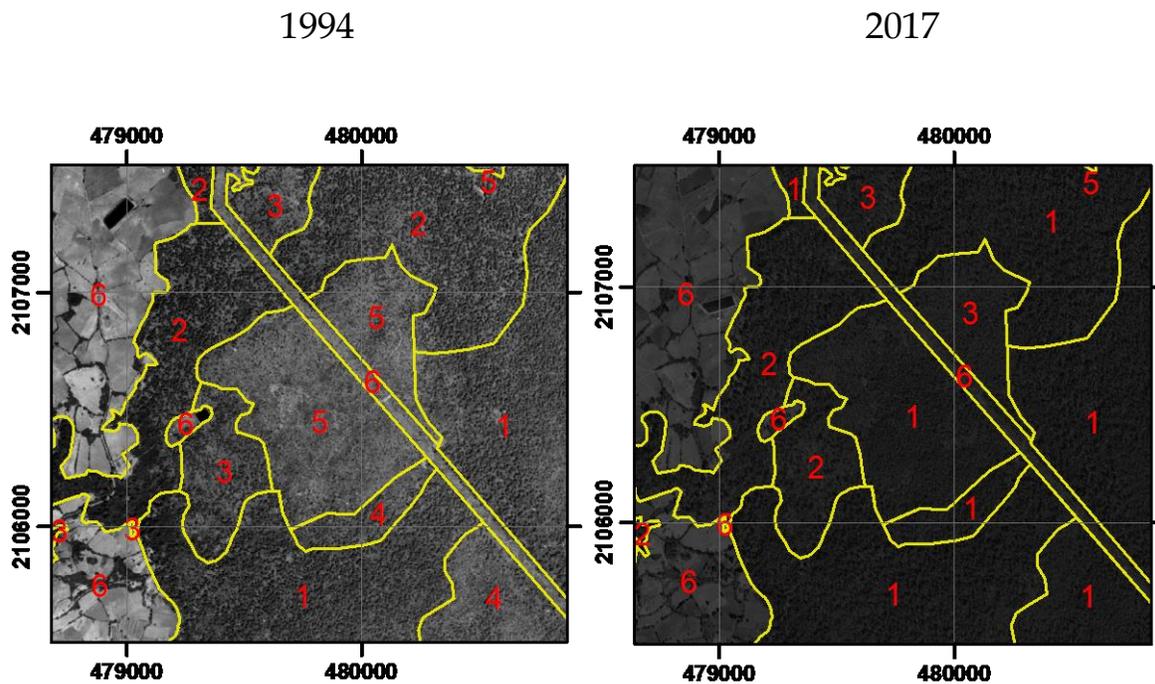


Figura 22. Áreas con recuperación por reforestación.

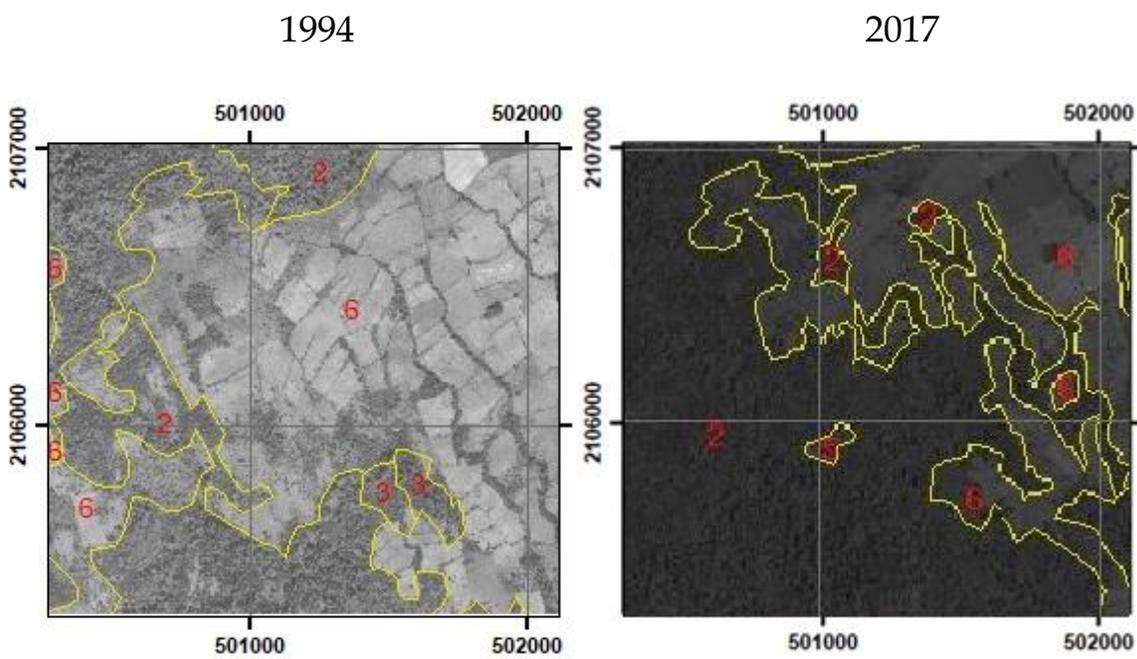


Figura 23. Áreas con recuperación por forestación.

4.2 Áreas con perturbación

Los procesos negativos que generan una perturbación fueron mejor representados en las coberturas tropicales, principalmente la degradación forestal, un ejemplo de ello es el cambio de una cobertura semicerrada (8) pasa a abierta (10) (Figura 24). La deforestación aportó el 6.4% de los cambios, en este proceso las coberturas fueron disminuidas en su arbolado hasta tener menos del 10%. En la figura 16 se muestra una cobertura abierta (9) pasa a la categoría deforestado (11) (Figura 25).

El cambio de uso de suelo se registró en 950 ha y aportó el 4.8% de cambios, en la figura 26 se observan coberturas que fueron remplazadas para dar un uso diferente al forestal. En la figura 26 se muestra una cobertura cerrada (7) que pasa a área miscelánea (12), que en este caso representan asentamientos humanos.

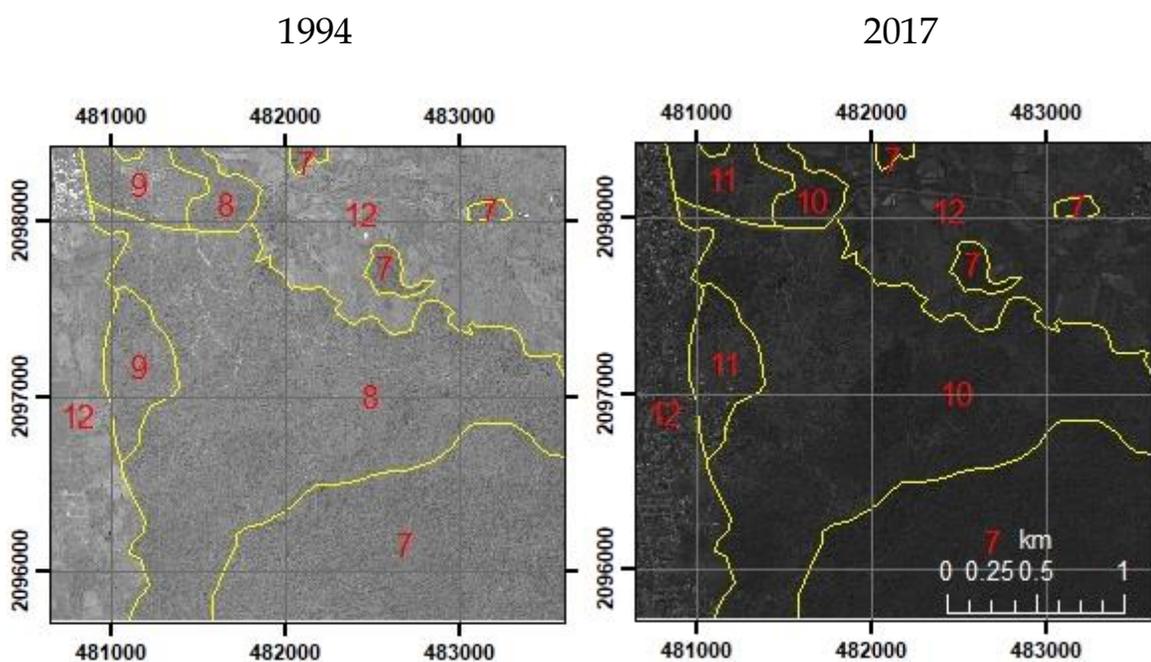


Figura 24. Áreas con perturbación por degradación forestal.

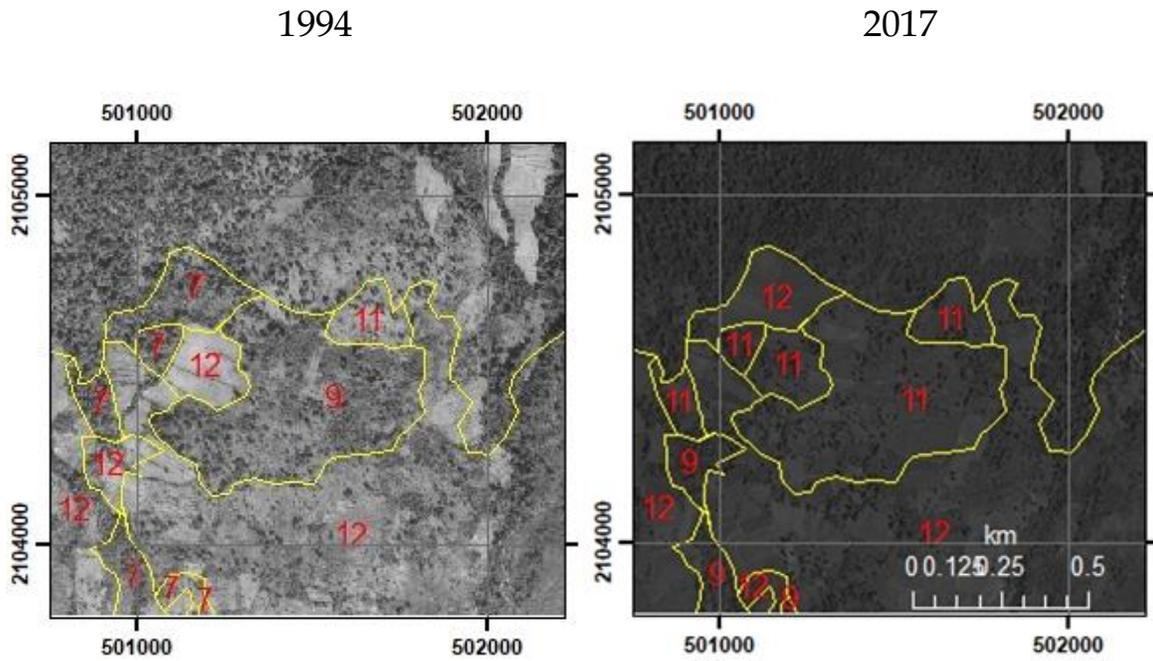


Figura 25. Áreas con perturbación por deforestación.

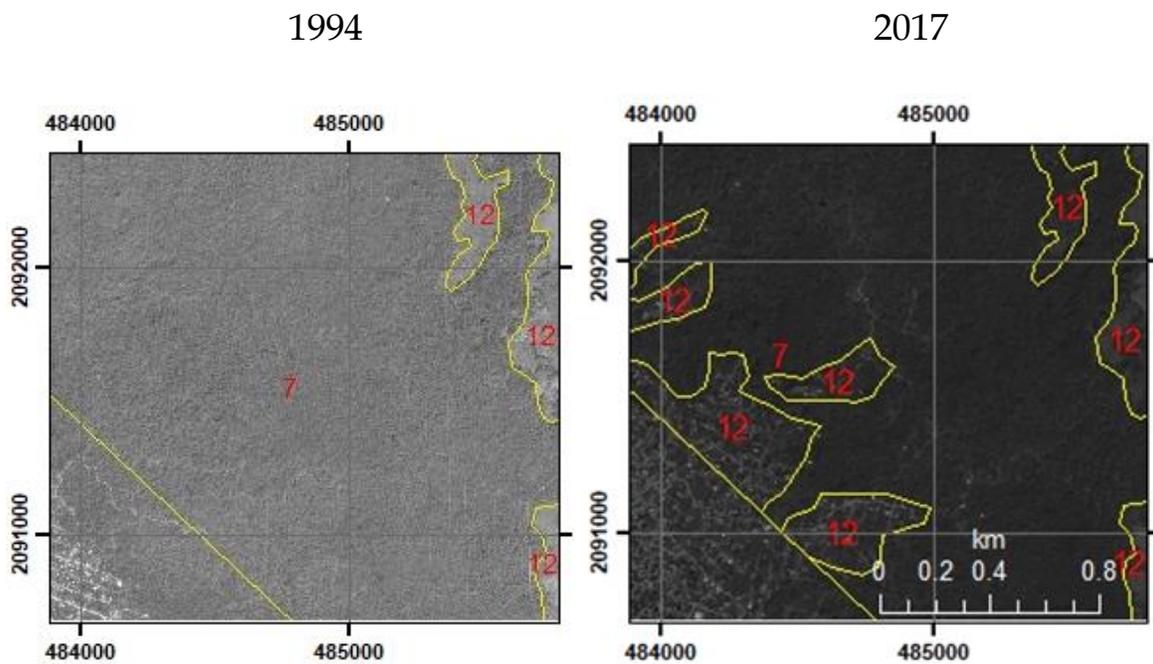


Figura 26. Áreas con perturbación por cambio de uso de suelo.

5. Tasa de cambio

En general la tasa de cambio para el periodo 1994-2017 fue de 0.13%, sin embargo, las coberturas templadas presentaron una tasa de cambio mayor esta fue de 0.86% lo que representa un cambio de 52.7 ha/año, mientras que los cambios en las coberturas tropicales representan un cambio de 2.8 ha/año, con una tasa del 0.02% (Cuadro 16).

Cuadro 16. Tasas de cambio periodo 1994-2017.

| Cobertura forestal | S ₁ | S ₂ | Diferencia | Años | Tasa de cambio | % Tasa de cambio anual | ha/año |
|-----------------------|----------------|----------------|--------------|-----------|----------------|------------------------|-------------|
| Templado | 27,620 | 28,831 | 1,211 | 23 | 0.0086 | 0.86 | 52.7 |
| Tropical | 11,868 | 11,933 | 65 | 23 | 0.0002 | 0.02 | 2.8 |
| Total forestal | 39,488 | 40,764 | 1,276 | 23 | 0.0013 | 0.13 | 55.5 |

6. Áreas con pago por servicios ambientales hidrológicos

Dentro del corredor biológico se encontraron inscritas en el programa de Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos 10,862 ha durante el periodo comprendido entre 1994-2017. De esta área el 89.2% corresponde al estado de Morelos, 5.7% al estado de México y el 4.9% a la ciudad de México (Cuadro 17).

Cuadro 17. Áreas con PSAH dentro de la zona en estudio.

| PSAH | ha | % |
|------------------|---------------|---------------|
| Ciudad de México | 537 | 4.94 |
| Estado de México | 629 | 5.79 |
| Morelos | 9,696 | 89.27 |
| Total | 10,862 | 100.00 |

En la figura 27 se muestran las áreas que se encuentran inscritas en el programa Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos.

AREAS CON PSAH

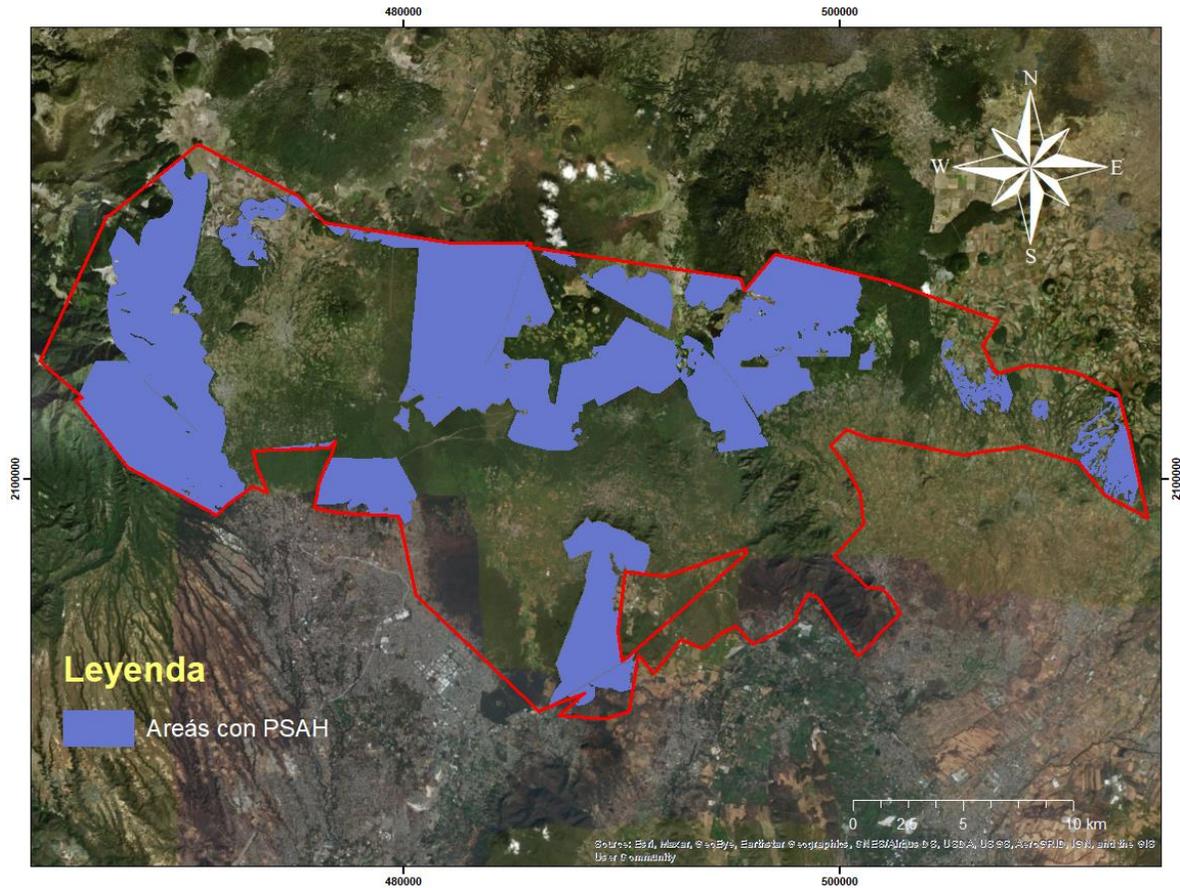


Figura 27. Áreas con Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos.

De las 19,620 ha que se transformaron, el 40.4% (7,936 ha) se dio en áreas con PSAH, de estos cambios el 82.4% (6,536 ha) implicó una recuperación, donde la densificación fue el proceso dominante, aportando el 62.6% (4,966 ha) de los cambios. Los procesos de alteración cambiaron el restante 17.6% (1,399 ha), donde la degradación fue el proceso que más cambios aportó con el 11% (870 ha) (Cuadro 18).

Cuadro 18. Procesos de cambio en áreas con PSAH.

| Procesos de cambio | | (ha) | Total (ha) | Porcentaje (%) | Total (%) | Diferencia (ha) | Diferencia (%) |
|--------------------|------------------------|-------|------------|----------------|-----------|-----------------|----------------|
| Positivos | Densificación | 4,966 | 6,536 | 62.6 | 82.4 | 5,137 | 64.7 |
| | Reforestación | 1,036 | | 13.1 | | | |
| | Forestación | 535 | | 6.7 | | | |
| Negativos | Degradación forestal | 870 | 1,399 | 11 | 17.6 | | |
| | Deforestación | 450 | | 5.7 | | | |
| | Cambio de uso de suelo | 79 | | 1.0 | | | |
| Total con cambio | | 7,936 | 7,936 | 100 | | | |

7.1 Estimación de cambio en áreas con PSAH de clima templado

El 95.1% (7,548 ha) del área inscrita en el programa PSAH, corresponde a las coberturas de clima templado y el 4.9% (388 ha) a las coberturas de clima tropical.

En las coberturas de clima templado los procesos positivos rebasan por un 62.8% (4,987 ha) a las alteraciones negativas; los primeros se encuentran representados por una densificación, la cual aumento el dosel de 4,738 ha, mientras que los segundos fueron representados en menor medida por la degradación forestal la cual afecto a 779 ha (Cuadro 19).

| Procesos de cambio | | Hectáreas (ha) | Total (ha) | Porcentaje (%) | Total (%) | Diferencia (ha) | Diferencia (%) |
|--------------------|------------------------|----------------|------------|----------------|-----------|-----------------|----------------|
| Positivos | Densificación | 4,738 | 6,267 | 59.7 | 79 | 4,987 | 62.8 |
| | Reforestación | 999 | | 12.6 | | | |
| | Forestación | 531 | | 6.7 | | | |
| Negativos | Degradación forestal | 779 | 1,280 | 9.8 | 16.1 | | |
| | Deforestación | 432 | | 5.4 | | | |
| | Cambio de uso de suelo | 69 | | 0.9 | | | |
| Total con cambio | | 7,548 | 7,548 | 95.1 | | | |

Cuadro 19. Procesos de cambio en áreas con PSAH de clima templado.

7.2 Estimación de cambio en áreas con PSAH clima tropical

Las coberturas de clima tropical inscritas bajo el programa representan el 4.9%. En estas coberturas se presenta la misma tendencia que la de clima templado, a diferencia de en estas el cambio de uso de suelo afecto a más hectáreas que su homólogo positivo la forestación, con 10 y 4 hectáreas respectivamente (Cuadro 20).

Cuadro 20. Procesos de cambio en áreas con PSAH clima tropical.

| Procesos de cambio | | Hectáreas (ha) | Total (ha) | Porcentaje (%) | Total (%) | Diferencia (ha) | Diferencia (%) |
|--------------------|------------------------|----------------|------------|----------------|-----------|-----------------|----------------|
| Positivos | Densificación | 228 | 269 | 2.9 | 3.4 | 150 | 1.9 |
| | Reforestación | 37 | | 0.5 | | | |
| | Forestación | 4 | | 0.05 | | | |
| Negativos | Degradación forestal | 91 | 119 | 1.1 | 1.5 | | |
| | Deforestación | 18 | | 0.2 | | | |
| | Cambio de uso de suelo | 10 | | 0.1 | | | |
| Total con cambio | | 388 | 388 | 4.9 | | | |

VIII. Discusión

En este estudio dentro del Corredor Biológico Chichinautzín se estimó una superficie forestal de 39,488 ha para 1994 y 40,764 ha para el año 2017, dichos datos son menores a los reportados por Vega-Guzmán y colaboradores (2007), quienes mediante el Análisis espectral y visual de vegetación con apoyo de fotografías aéreas, estimaron una superficie forestal de 44,416 ha, mientras que un estudio realizado por el Fondo Mexicano para la conservación de la naturaleza mediante la clasificación digital y uso de imágenes satelitales, reporto una superficie forestal de 45,361 ha para el año 2000 y 45,226 ha para el año 2008. Estas variantes en superficie forestal dentro de la zona en estudio muy probablemente corresponden a los diferentes insumos, formas de clasificación y criterios utilizados; que corresponden a los diferentes intereses específicos de cada investigación; por lo que no significa que los valores aquí presentados sean erróneos. En todo caso se considera que estos valores son los más cercanos a la realidad, debido a que se evitaron errores asociados a la clasificación de píxeles erróneos tal como sucede en clasificaciones digitales, debido a que la clasificación fue totalmente visual y el ojo humano es capaz de distinguir características más precisas que la computadora (Horning, 2004), además de la utilización de imágenes con una alta resolución espacial y a una escala relativamente pequeña de 1:5000, lo cual permite una correcta clasificación (López-García, 2019); asimismo se adoptaron términos y criterios de acuerdo a la FAO (2018).

Los cambios en las coberturas forestales en general fueron positivos, debido a que los procesos de densificación y reforestación presentaron porcentajes mayores que sus homólogos negativos. Esto se debe a la suma de acciones que generan los programas enfocados a la conservación en el estado de Morelos debido a su importancia a nivel regional en la recarga de acuíferos (ECOBA, 2012 y CONAFOR, 2018b), un ejemplo de ello son: el Programa Estatal de Recuperación Morelos, el

programa de Restauración forestal en cuencas hidrográficas prioritarias y los programas de reforestación de Coca-Cola company, los cuales han realizado plantación de arbolado en 5,438, 4,549 y 630 hectáreas respectivamente, dichas plantaciones se han llevado a cabo en la parte norte del estado donde se localiza la zona en estudio (PRONARE, 2002; Calderón *et al.*, 2018); lo que ha llevado a que el estado de Morelos sea una de las seis entidades federativas que cuentan con una superficie reforestada mayor a la superficie pérdida, indicando que, por cada hectárea perdida, en promedio se recuperan cinco (Céspedes y Moreno, 2010). En cuanto a las forestaciones, en la zona en estudio se debieron a la conversión de áreas dedicadas a la agricultura que debido al abandono se convirtieron a bosque, este es un proceso natural de regeneración (FAO, 2015), incluso un estudio similar de cambio de cobertura forestal en la porción norte del bosque de agua ha reportado este mismo fenómeno (Ángeles, 2018) cabe recordar que la zona en estudio forma parte del bosque de agua.

Por otra parte, las perturbaciones representadas por la degradación forestal y deforestación se deben principalmente a la gran cantidad de incendios forestales que se han presentado en el estado, tan solo en el periodo de 1994-2017 se registraron 4,683 siniestros, donde el 55.3% de las causas fueron las actividades agropecuarias como la quema para desmonte, pastoreo y preparación del suelo para siembra (CONAFOR, 2018b). El cambio de uso de suelo se presentó como consecuencia del aumento de actividades humanas como la agricultura, la cual ha presentado incremento en las últimas décadas (Calderón *et al.*, 2018). Esto es entendible debido a que la creciente población demanda más recursos por lo que van acabándose los

La distinción de bosques de acuerdo al tipo de clima, fue útil para poder entender los procesos de transformación que enfrentan, en el caso de los bosques templados, en general son mayormente favorecidos debido a que los programas enfocados a la preservación de cobertura forestales se centran en este tipo de bosques, tal como lo menciona Calderón y colaboradores (2018); debido a su mayor

capacidad de retención y filtración del agua (Pagiola *et al.*, 2003), lo que explica porque estas coberturas presentaran tasas de cambio mayores, que las de clima tropical, de 0.86 y 0.02%; también explica porque los bosques templados ocupan más del 95% de la superficie inscrita en el programa de PSAH dentro del corredor. Esto ha generado que los bosques tropicales se encuentren en desventaja respecto a los templados, por lo que no se encuentren bajo los mismos niveles de conservación, incluso se evidencio la perdida de este tipo de bosques en la parte suroeste del polígono de la zona en estudio, a causa de la expansión de la ciudad de Cuernavaca, esto es consistente con lo reportado por el Fondo Mexicano para la conservación de la naturaleza (2009)

Particularmente las áreas con PSAH presentaron recuperaciones en el 82.4% de la superficie inscrita, lo que indica que este programa favorece el incremento del dosel arbóreo y la extensión del bosque como lo indica López-García y Manzo-Delgado en 2015. Sin embargo, como lo menciona Perevochtchikova (2004), este tipo de programas no actúa de manera aislada, está sujeta o la acción de programas similares enfocados a la conservación.

IX. Conclusión

En el presente estudio se encontró que dentro del Corredor Biológico Chichinautzín, se presenta un proceso de densificación en las coberturas forestales, sin embargo, estas recuperaciones estuvieron fuertemente representadas en las áreas que cuentan con Pago por Servicios Ambientales hidrológicos por lo que se afirma que este programa ha tenido un efecto positivo en la recuperación de la cubierta forestal dentro de la zona en estudio. Por otra parte, se reconoce que aún faltan mejoras en la aplicación de este programa para evitar las perturbaciones como la deforestación y el cambio de uso de suelo, debido a que dichos procesos también se presentaron en áreas con PSAH.

X. Literatura citada

- Aguilar, C., Martínez, E., y Arriaga, L. (2000). Deforestación y fragmentación de ecosistemas: ¿Qué tal grave es el problema en México? *Biodiversitas* 30, pp. 7-11.
- Ángeles Miramontes (2018). *Análisis de los cambios de la cobertura forestal del bosque de agua, desde Jilotzingo hasta Chapa de Mota*. Tesis de licenciatura en Biología. Facultad de Estudios Superiores Iztacala. Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- Armenteras, D., Gast, F. y Villareal, H. (2003). Andean forest fragmentation and the representativeness of protected natural areas in the eastern Andes, Colombia. *Biological Conservation*, 113(2), pp. 245-256.
- Batllori G., A. (2001). Los problemas ambientales del estado de Morelos: la educación como parte de la solución. *Gaceta Ecológica* 61, pp. 47-60.
- Bishop, J., Landell-Mills, N. (2003). Los servicios ambientales de los bosques: Información General En S. Pagiola, N. Landell-Mills, J. Bishop (Ed). *La venta de servicios ambientales forestales* (pp. 43-76). Ciudad de México, México: Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT)
- Bonilla- Barbosa, R. J., Mora, V., Figueroa-Luna, J., Colín, H. y Santillan-Alarcón, S. (2010). *Biodiversidad, conservación y manejo en el Corredor Biológico Chichinautzín. Condiciones actuales y perspectivas*. Universidad Autónoma del Estado de Morelos. México.
- Bruschweiler, S., Hoggel, U., Klay, A. (2004). Los bosques y el agua: interrelaciones y su manejo. *Informes de desarrollo y medio ambiente* 19. Centro de desarrollo y medio ambiente. Berna
- Calderón Escandón, J., Ordoñez Diaz, J., Nieto Pascual, M., Ordoñez Diaz, M. (2018). Cambio en la cobertura vegetal y uso de suelo del 2000 al 2009 en Morelos, México. *Revista Mexicana de Ciencias forestales* 9 (46)

-
- Calzada Peña L. (2015). *Evaluación del cambio de cobertura forestal en dos comunidades bajo pago por servicios ambientales hidrológicos en la cuenca de México* (Tesis de licenciatura en Biología). Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. México.
 - Céspedes Flores, S. E. y Moreno-Sánchez, E. (2010). Estimación del valor de la pérdida de recurso forestal y su relación con la reforestación en las entidades federativas de México. *Investigación ambiental 2* (2), pp. 5-13.
 - Challenger, A., y Soberón, J. (2008). Los ecosistemas terrestres, en *Capital natural de México, vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad*. (pp. 87-108). México: CONABIO
 - CONABIO y UAEM. (2004). *La Diversidad Biológica en Morelos: Estudio del Estado*. Jaramillo (editores). México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad y Universidad Autónoma del Estado de Morelos.
 - COLPOS. (2004). Evaluación del programa de pago de servicios ambientales hidrológicos (PSAH). Recuperado de <https://www.cnf.gob.mx:8443/snif/portal/component/phocadownload/category/118-psah?download=548:informe-final>
 - CONAFOR. (2009). El Inventario Nacional Forestal y de Suelos de México 2004-2009. Una herramienta que da certeza a la planeación, evaluación y el desarrollo forestal de México. Recuperado de <https://www.conafor.gob.mx/biblioteca/Inventario-Nacional-Forestal-y-de-Suelos.pdf>
 - CONAFOR. (2012a). Inventario Nacional Forestal y de Suelos. Informe 2004-2009. Recuperado de http://www.ccmss.org.mx/wp-content/uploads/2014/10/Inventario_nacional_forestal_y_de_suelos_informe_2004_-_2009_.pdf
 - CONAFOR (2012b). Bosques Cambio climático y REDD+ en México. Guía básica. Recuperado de

<http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2011/CD001414.pdf>

- CONAFOR (2018). Inventario Nacional Forestal y de Suelos. Informe de resultados 2009-2014. Recuperado de <https://snigf.cnf.gob.mx/wp-content/uploads/Resultados%20Hist%C3%B3ricos%20INFyS/2009%20-%202014/Informe%20de%20resultados/Informe%20inventario%202009%20-%202014.pdf>
- CONAFOR (2018b). Programa Estatal de Prevención de Incendios Forestales. Estado de Morelos
- CONANP (2004). Programa de Manejo del Corredor Chichinautzín. Recuperado de http://www.conanp.gob.mx/conanp/dominios/chichinautzin/que_hacemos/Programa_de_Manejo_04.pdf
- CONANP (2017). Mapa de las Áreas Naturales Protegidas Federales de México. Recuperado de <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- Costanza, R., de Groot, R., Ferber, S., Hannon, B. (1997). The value of the world ecosystem services and natural capital. *Nature* 387, pp. 253-260
- ECOBA (2012). *Estrategia Regional para la Conservación del Bosque de Agua*. México: Fundación Gonzalo Río Arronte, I.A.P., Fundación Biósfera del Anáhuac, A.C. y Pronatura México, A.C.
- FAO (1996). *Forest resources assessment 1990. Survey of tropical forest cover and study of change processes*. Roma: FAO
- FAO. (2000). *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2000*. Roma: FAO
- FAO (2015). *Restauración de bosques y paisajes*. Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-i5212s.pdf>
- FAO. (2016). *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2015 ¿Cómo están cambiando los bosques del mundo?* Roma: FAO

-
- FAO (2018). *Términos y definiciones FRA 2020*. Recuperado de <http://www.fao.org/3/I8661ES/i8661es.pdf>
 - Fregoso, A. (2006). La oferta y el pago de los servicios ambientales hídricos: una comparación de diversos estudios. *Gaceta Ecológica* 78 pp. 29-46
 - Fondo mexicano para la conservación de la naturaleza. (2009). *Estimación y Actualización de la Tasa de Transformación del Hábitat de las Áreas Naturales Protegidas SINAP I y SINAP II del FANP*. CONANP
 - Gardner, T., Barlow, J., Chazdon, R., Ewers, R., Harvey, C., Perez, C. y Sodhi, S., (2009). Prospects for tropical forest biodiversity in a human-modified world. *Ecology Letters* 12 (6) pp. 561-582
 - Hanson, S., Chuvieco, E., Pons, X., Domingo, C., Cea, C., More, G., Cristóbal, J., Tejeiro, J.A. (2011). Cadena de preprocesamiento estándar para las imágenes del plan Nacional de Teledetección. *Revista de Teledetección* 36 (pp.51-61). Madrid, España.
 - Heistermann, M., Muller, C. y Ronneberger, K., (2006). Land in Sight? Achievements, deficits and potentials of continental global scale land-use modeling. *Agriculture, ecosystems and Environment*, 114 (2-4), pp. 141-158.
 - Horning, N. (2004). Land cover classification methods, Version 1.0. American Museum of Natural History, Center for Biodiversity y Conservation. Recuperado de <http://biodiversityinformatics.amnh.org>.
 - IEFyS Morelos (2014). Inventario Estatal de Morelos. Recuperado de
 - INEGI (1996). Anuario estadístico del Estado de Morelos 1996. Recuperado de http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825200558-1/702825200558-1_3.pdf

-
- INEGI (2016). Mapa de la División política municipal, 1:250000. 2015. Recuperado de <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
 - INEGI (2017). Anuario estadístico y geográfico de Morelos 2017. Recuperado de https://www.datatur.sectur.gob.mx/ITxEF_Docs/MOR_ANUARIO_PDF.pdf
 - INECC (2019). Instituto nacional de ecología y cambio climático. México. Recuperado de <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/108/mor.html>
 - Lambin, E. F. y Geist, H. (2006). Land-use and land-cover change local processes and global impacts. Berlin: Springer-Verlag.
 - López-García, J. (2007). Análisis de cambio de la cobertura forestal en la reserva de la mariposa monarca (2006-2007). *Fondo para la conservación de la mariposa monarca*. Ciudad de México
 - López-García, J., y Manzo Delgado, L.L. (2015). Evaluación de cambios en la densidad de cobertura forestal en la reserva de la biosfera mariposa monarca para determinar el pago por servicios ambientales. En A. A. Villavicencio. (Ed.), *Los pagos por servicios ambientales, intercambio de experiencias de la red iberoamericana de PSA* (pp. 119-150). Zamora Michoacán, México: El colegio de Michoacán
 - López-García, J. (2019). Changes in forest cover in Sierra Nevada, México, 1994-2015. *Journal of Maps* 15(2), (pp. 418-424).
 - Manson, R. H. (2004). Los servicios hidrológicos y la conservación de los bosques de México. *Madera y bosques* 10(1), (pp. 3-20)
 - Millenium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*

-
- Mas, F. y Fernández, T. (2003). Una evaluación cuantitativa de los errores en el monitoreo de los cambios de cobertura por comparación de mapas. *Investigaciones geográficas* 51 (pp.7387). Instituto de Geografía. México
 - Mora-Carvajal, M., Bustamante González, A., Cajuste Bontemps, L., Vargas López, S., Cruz Bello, G., y Ramírez Juárez, J. (2019). Pago por servicios ambientales hidrológicos y dinámica de la cobertura arbórea en la región Iztaccihuatl-Popocatepetl. *Acta Agronómica* 68 (2) inédito.
 - ONU. (1992). Informe de la conferencia de las naciones unidas sobre el medio humano. Estocolmo. Recuperado de <https://www.un.org/spanish/esa/sustdev/documents/declaracionrio.htm>
 - Pagiola, S., Landell-Mills, N., y Bishop, J. (2003). Mecanismos basados en el mercado para la conservación y el desarrollo. En S. Pagiola, N. Landell-Mills, J. Bishop (Ed). *La venta de servicios ambientales forestales* (pp. 23-42). Ciudad de México, México: Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT)
 - Paz Salinas, M., (2005). *La participación en el manejo de áreas naturales protegidas. Actores e intereses en conflicto en el Corredor Biológico Chichinautzín, Morelos.* Centro Regional de Investigación Multidisciplinaria. UNAM. Cuernavaca, Morelos. México: UNAM
 - Perevochtchikova, M., Carrillo Rivera, J.J., Peñuela Arévalo, L.A., Muñoz Piña, C., (2004). *Servicios ambientales hidrológicos en México 2003-2004: Visión geográfica.* Ciudad de México (inédito).
 - Perevochtchikova, M., Saavedra Diaz, Z. M. (2017). Evaluación ambiental integrada de áreas inscritas en el programa federal de pago por servicios ambientales hidrológico. Caso de estudio: Ajusco, México. *Investigaciones Geográficas* 93 (pp. 10-29)
 - Pichardo Peña, R. (2016). *Propuesta para el mejoramiento y aprovechamiento sustentable del Parque Nacional Lagunas de Zempoala* (Tesis de licenciatura en

- Ciencias Ambientales). Universidad Autónoma del Estado de México. México.
- Pompa Rangel, F. (2016). *Pago por servicios ambientales en México: ¿Alternativa eficaz para contrarrestar la degradación de los ecosistemas?* (Tesis de grado como Especialista en Economía Ambiental y Ecológica). Universidad Nacional Autónoma de México. México.
 - Rzedowski, J. (1978). *Vegetación de México*. Limusa, México
 - Sala, O.E., Chapin, F.S., Armesto, J.J., Berlow, E., Bloomfield, J., *et al* (2000) Global Biodiversity Scenarios for the Year 2100. *Science* 287 (5459) (pp. 1770-1774).
 - Santillán Alarcón, S., Sorani, V., Bonilla-Barbosa, J. R., Figueroa, L. y Colin, H. 2010. Escenario geográfico. En *Biodiversidad, conservación y manejo en el Corredor Biológico Chichinautzín. Condiciones actuales y perspectivas*. Universidad Autónoma del Estado de Morelos. México.
 - Sarukhán, J., Koleff, P., Carabias, J., Soberón, J., Dirzo, R., Llorente-Bousquets, J., Halffter, G., González, R., March, I., Mohar, A., Anta, S y De la Maza, J. (2009). *Capital natural de México. Síntesis: conocimiento actual, evaluación y perspectivas de sustentabilidad*. México: CONABIO.
 - SEMARNAT (2016). Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores clave, desempeño ambiental y de crecimiento verde. Recuperado de https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/pdf/Informe_15_completo.pdf
 - SEMARNAT (2018). Secretaria del medio ambiente y recursos naturales. 2018. Ley General De Desarrollo Forestal Sustentable. Publicado el 5 de junio de 2018 en el Diario Oficial de la Federación. Texto vigente.

-
- Trejo, I., y Hernández, J. (1997). Identificación de la selva baja caducifolia en el estado de Morelos, México, mediante imágenes de satélite. *Investigaciones Geográficas Boletín número especial* (5)
 - Torres Pérez, D. (2018). *Gobernanza y medios de vida en programas locales de pago por servicios ambientales hidrológicos: el caso de las subcuencas del río Gavilanes y Pixquiac* (Tesis de doctor en Economía). Universidad Nacional Autónoma de México. México.
 - Vega Guzmán, A., López García, J., Manzo Delgado, L.L. (2008). Análisis espectral y visual de vegetación y uso del suelo con imágenes Landsat ETM+ con apoyo de fotografías aéreas digitales en el Corredor Biológico Chichinautzín, Morelos, México. *Investigaciones geográficas boletín* 67 (pp. 59-75).
 - Velázquez, A., Mas, J. F., Mayorga Saucedo, R., Díaz, J. R., Alcántara, C., Castro, R., Fernández, T., Palacio, J. I., Bocco, G., Gómez Rodríguez, G., Luna González, L., Trejo, I., López García, J., Palma, M., Peralta, A., Prado Molina, J., y González Medrano, F. (2002). Estado actual y dinámica de los recursos forestales de México. *Biodiversitas* 41 (pp. 8-15).
 - Velázquez Fragoso, L. (2011). *Impactos sociales del pago de servicios ambientales en el estado de México* (Tesis de Maestra en Ciencias Económicas). Instituto Politécnico Nacional, México.
 - Wunder, S. (2006). *Pago por servicios ambientales: Principios básicos esenciales*. Indonesia: Centro Internacional de Investigación forestal
 - Wunder, S., Wertz- Kanounnikoff, S., Moreno-Sánchez, R., (2007). Pago por servicios ambientales: una nueva forma de conservar la biodiversidad. *Gaceta ecológica* 84-85 (pp. 39-52).