



Análisis multitemporal de la degradación de los bosques de encino y oyamel en la Cuenca de México (1993-2014)

Multitemporal analysis of the degradation of the oak and oyamel forests in the Basin of Mexico (1993-2014)

Gabriela Santibáñez-Andrade^{1*}, José René Valdez-Lazalde² y Francisco Guerra-Martínez³

¹ Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geografía. Ciudad Universitaria, Ciudad de México, México.

² Colegio de Postgraduados. Campus Montecillo. Texcoco, Estado de México, México.

³ Universidad Nacional Autónoma de México. Escuela Nacional de Estudios Superiores. Unidad Mérida. Mérida Yucatán, México.

* Autora de correspondencia.
gabysant@ciencias.unam.mx

RESUMEN

El conocimiento de la dinámica de cambio de cobertura, uso del suelo (CCUS) y de la degradación forestal es crucial en países en desarrollo para la prevención de la deforestación, así como para la planificación de actividades de restauración y rehabilitación de los bosques. Actualmente no existen estudios acerca de la dinámica de CCUS de los bosques templados de la Cuenca de México, estos procesos no han sido cartografiados ni cuantificados a escala regional. En este estudio se determinaron las tasas y las trayectorias de cambio de las coberturas existentes y se analizaron procesos de cambio específicos como permanencia, degradación, deforestación y recuperación. Además, se generó un mapa de distribución espacial de los bosques de oyamel y de encino con diferente grado de degradación (bosque primario, bosque primario degradado, bosque secundario y tierra forestal degradada). Se encontró que, durante el período completo de análisis (21 años, 1993-2014), el bosque primario de oyamel recuperó 610 ha (~29 ha por año) pero se degradaron 1062 (~50 ha por año) y se perdieron 689 ha (~32 ha por año). Para el caso del bosque primario de encino, durante el período total se recuperaron 2104 ha (~100 ha por año), se degradaron 3370 ha (~160 ha por año) y se perdieron 2773 ha (~132 ha por año). La información generada en este estudio servirá de base para la identificación de áreas potenciales para la restauración y el diseño de estrategias de gestión para generar oportunidades de conservación.

PALABRAS CLAVE: cambio de cobertura y uso de suelo (CCUS), deforestación, permanencia, recuperación, restauración, transición forestal.

ABSTRACT

Knowledge of the dynamics of cover change, land use (CCUS) and forest degradation is crucial in developing countries for the prevention of deforestation, as well as the planning of forest restoration and rehabilitation activities. Currently, there are no studies on the dynamics of CCUS in the temperate forests of the Mexico Basin; these processes have not been mapped and quantified at a regional scale. In this study, the rates, and trajectories of change in existing coverage were determined and specific change processes such as permanence, degradation, deforestation, and recovery were analyzed. In addition, a spatial distribution map of the fir and oak forests with different degrees of degradation (primary forest, degraded primary forest, secondary forest, and degraded forest land) was generated. It was found that during the entire period of analysis (21 years, 1993-2014) the primary oyamel forest recovered 610 ha (~29 ha per year) but 1062 (~50 ha per year) were degraded and 689 ha were lost (~32 ha per year). In the case of the primary oak forest, during the total period, 2104 ha (~100 ha per year) were recovered, 3370 ha were degraded (~160 ha per year) and 2773 ha were lost (~132 ha per year). The information generated in this study will serve as the basis for the identification of potential areas for restoration and the design of management strategies to generate conservation opportunities.

KEYWORDS: land use cover change (LUCC), deforestation, permanence, recovery, restoration, forest transition.

INTRODUCCIÓN

Más de una tercera parte de los bosques del planeta están clasificados como bosques primarios, los cuales se definen como bosques de especies nativas que no han sufrido perturbaciones significativas y en los cuales los procesos ecológicos no han sido alterados de un modo apreciable (*Food and Agriculture Organization* [FAO], 2020). Estos bosques proporcionan una amplia gama de servicios ecosistémicos, tales como la protección del suelo contra la erosión, la regulación del régimen hidrológico, el suministro de agua dulce, la captura y almacenamiento de carbono, la producción de oxígeno, la provisión de hábitats y resguardo de la biodiversidad. Según la FAO (2020), el área global de bosques primarios descendió 81.3 millones de hectáreas en el período 1990-2020, debido principalmente al cambio de uso de la tierra (deforestación) y al aprovechamiento forestal (FAO y *United Nations Environment Programme* [UNEP], 2020) dando paso a bosques secundarios. Los bosques secundarios resultan de una perturbación significativa que modifica la estructura y la composición del bosque previo (FAO, 2009; Gottret y Stoian, 2017), limitando su capacidad de brindar servicios ambientales en comparación con los bosques primarios. Actualmente, los bosques secundarios constituyen un componente importante y creciente del uso de la tierra y la cobertura forestal.

El Informe de Evaluación de Recursos Forestales 2015 menciona que el área de bosques secundarios asciende a 2337 millones de hectáreas a escala mundial, lo cual constituye 58% del área forestal global (FAO, 2015). En México, la superficie forestal abarca 137.8 millones de hectáreas, de las cuales, 94.5 son vegetación primaria y 43.3 vegetación secundaria (Comisión Nacional Forestal [Conafor], 2020). El conocimiento de la dinámica de cambios de cobertura y uso del suelo (CCUS) y de la degradación forestal es crucial en países en desarrollo para planificar la Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación (REDD+), iniciativa impulsada por el Programa de las Naciones Unidas y la Asociación Global sobre Restauración del Paisaje Forestal (Laestadius et al., 2011). Además, es necesario conocer los cambios

espaciotemporales que ocurren en el bosque para determinar un orden de prioridades en la asignación de recursos humanos y financieros destinados a la prevención de la degradación, la planeación de la restauración y la rehabilitación de los bosques (Chazdon, 2008; Simula y Mansur, 2011).

Mediante análisis de imágenes de satélite es posible evaluar de manera costoeficiente, paisajes extensos e incluso inaccesibles y de años anteriores, lo que permite conocer la dinámica del cambio forestal (Laestadius et al., 2011). La detección práctica de niveles de degradación a escala regional requiere de un “sistema de referencia” o PFI (paisajes forestales intactos) lo que remite al uso de los bosques primarios como línea base; sin embargo, debido a que los ecosistemas forestales están sujetos a variaciones naturales, es necesario realizar una evaluación prolongada para contar con mejores bases en la caracterización (Potapov et al., 2008). Una alternativa es definir gradientes de degradación de los bosques con un conocimiento de las fases sucesionales (Organization Internacional de Maderas Tropicales [OIMT], 2002; Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza [Catie], 2016), para ser utilizados como línea base para la implementación de técnicas de restauración forestal: a) *bosques primarios*: con cubierta forestal densa en la zona del paisaje forestal, nivel de área basal alto, altura de dosel regular y claros menos frecuentes; b) *bosques primarios degradados*: con cubierta forestal semidensa en la zona de paisaje forestal, nivel de área basal intermedio, dosel regular, pequeños claros, y árboles residuales que, a menudo, están dañados (copa, tronco) debido al corte selectivo, recolección de leña, pastoreo, creación de caminos y veredas, deficiente desarrollo del sotobosque, ausencia de clases jóvenes de especies del dosel forestal y menor presencia de especies heliófitas presentes en la masa forestal original; c) *bosques secundarios*: con cubierta forestal escasa (con menos de 10% de la cobertura forestal original), nivel de área basal más bajo, dosel irregular mayor presencia de claros, mayor presencia de especies heliófitas, mayor desarrollo del sotobosque y; d) *tierra forestal degradada*: sitios en los que se produce un desarrollo lento y donde la vegetación forestal es escasa o



nula, puede haber o no arbustos o árboles pioneros individuales o en grupos pequeños, a menudo debido al cambio de uso de suelo que presenta un alto grado de degradación impidiendo la regeneración natural por lo que son dominados por otros tipos de vegetación (pastizales) (Oliver y Larson, 1996; OIMT, 2002; Catie, 2016).

La Cuenca de México alberga alrededor de 1.5% de la biodiversidad global del planeta, cerca de 3000 especies de plantas vasculares en los diferentes tipos de vegetación como: bosques de oyamel, bosques de pinos, bosques de encinos, matorrales y pastizales (Palma et al., 2001). Cuevas et al. (2010) mencionan que, en esta área, procesos antrópicos como la degradación del suelo, la expansión urbana y agrícola, la ganadería, el aprovechamiento de leña y la introducción de especies exóticas han eliminado de 75.1% hasta 95% de sus sistemas naturales (Palma *et al.*, 2001). Por ello, la cuenca se ubica dentro de las de mayor estrés hidroecológico en el mundo respondiendo a la elevada carga que implica abastecer una población de más de 20 millones de habitantes (Rodríguez y Morales, 2013). Debido a lo anterior, actualmente la Cuenca de México es considerada como una de las regiones prioritarias para su conservación y restauración. Cuevas et al. (2010), realizaron una evaluación del estado actual de la vegetación de las cuencas de México utilizando la serie IV del Instituto Nacional de Estadística y Geografía [Inegi], año de referencia 2007 (Comisión Nacional para el conocimiento y Uso de la Biodiversidad [Conabio], 2023) caracterizando la vegetación primaria y secundaria, así como su conectividad. Sin embargo, actualmente no existen estudios puntuales acerca de la degradación de los bosques templados de la Cuenca de México, incluso estos procesos no han sido cartografiados ni cuantificados a escala regional y las trayectorias de cambio entre los tipos de cobertura no se han evaluado ni explicado.

Con el presente estudio se pretende generar información que pueda servir como base para analizar causas subyacentes de cambio, la identificación de áreas potenciales para la restauración y el diseño de estrategias de gestión para generar oportunidades de conservación.

OBJETIVOS

El objetivo de este estudio fue caracterizar la dinámica de cambio de la cobertura y uso del suelo en la Cuenca de México a través de un análisis multitemporal de las series II-VI del Inegi para: 1) determinar las tasas de cambio de las coberturas existentes; 2) analizar los procesos de cambio (permanencia, degradación, deforestación y recuperación); 3) analizar las trayectorias de cambio de los tipos de cobertura de suelo; y 4) generar un mapa de la distribución espacial de los bosques de oyamel y encino con diferente grado de degradación (bosque primario, bosque primario degradado, bosque secundario y tierra forestal degradada).

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La cuenca de México es una unidad hidrológica cerrada, su parte más baja, una planicie lacustre, tiene una elevación de 2240 m s.n.m. La delimitación de la cuenca de México bajo el criterio políticoadministrativo considera 85 municipios completos que comprenden una superficie total de 973 800 ha ubicadas en tres entidades federativas: Estado de México, Hidalgo y Tlaxcala, incluyendo la Ciudad de México (Fig. 1). La cuenca se encuentra rodeada en tres de sus lados por una sucesión de sierras volcánicas de más de 3500 m s.n.m. Las montañas periféricas a la cuenca representan un límite físico importante para la expansión de la mancha urbana. Las precipitaciones en la cuenca están concentradas en el verano, mayormente de junio a septiembre. Hay un pronunciado gradiente de precipitaciones dentro de la cuenca, desde áreas de gran cantidad de lluvias hacia el suroeste (aproximadamente 1500 mm anuales), hasta áreas de clima semiárido hacia el noreste (cerca de 600 mm por año). Las temperaturas medias anuales en el fondo de la cuenca son de aproximadamente 15 °C, con una amplitud de 8 °C entre las medias de verano y de invierno (Jáuregui, 1995). La Cuenca de México alberga diez tipos de vegetación: bosque de oyamel, bosque mesófilo de montaña, bosque de pinos, bosque de encinos, bosque de juníferos, matorral de encinos chaparros, matorrales xerófilos, pastizales, vegetación halófila y vegetación acuática (Rzedowski, 1978).

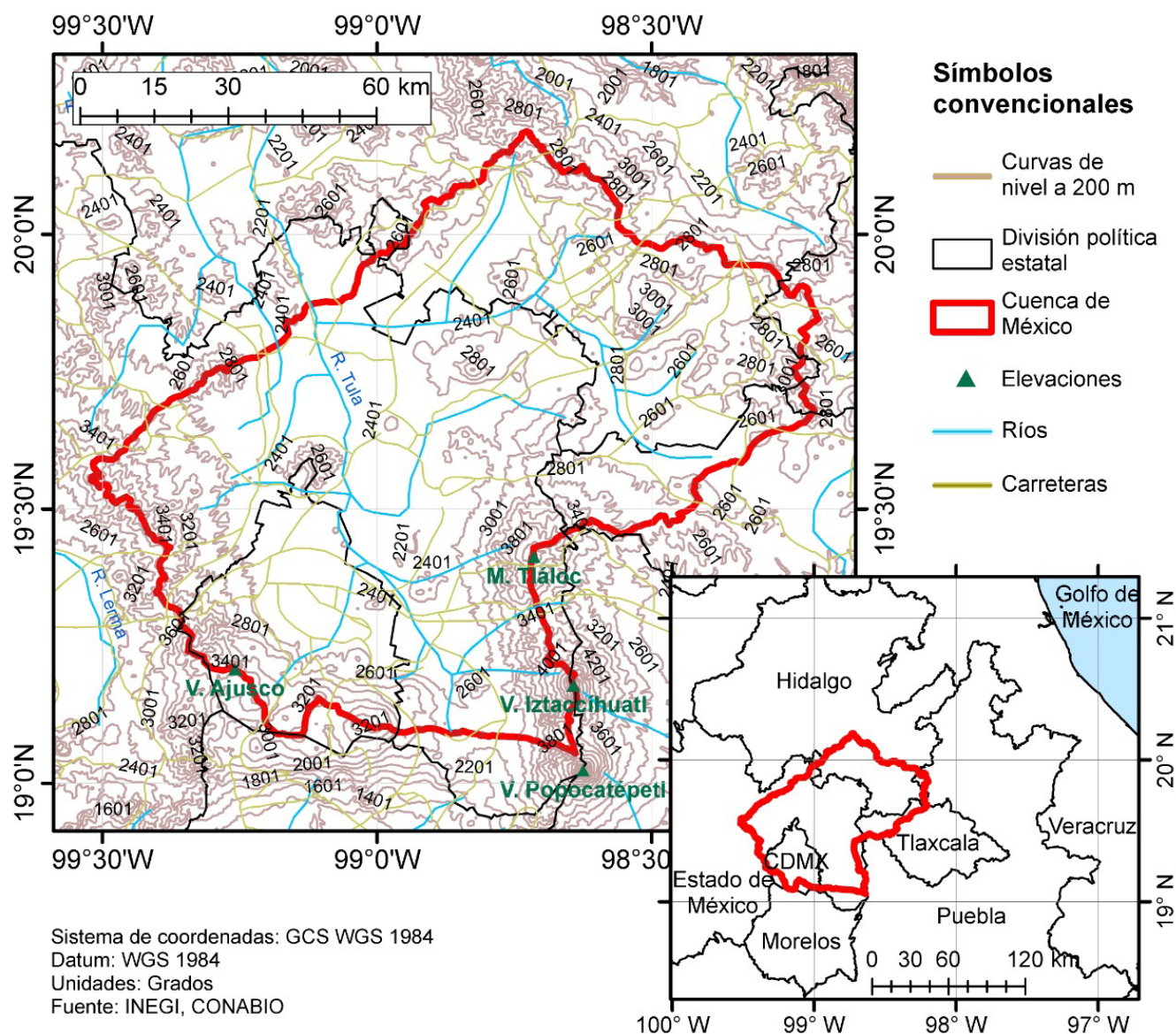


FIGURA 1. Localización de la Cuenca de México.

Su compleja topografía, variabilidad de altitudes y climas aunadas a su historia geológica (transición entre dos regiones biogeográficas del continente americano: la neártica y la neotropical) (Ceballos y Galindo, 1984) proveen un mosaico de ambientes y hábitats con elementos de insularización para un importante número de especies sedentarias, ocasionando un intrincado patrón de distribución de especies. Se estima que casi 1.5% de la biodiversidad global del planeta se alberga en la Cuenca de México, lo cual se aproxima a cerca de 3000 especies de

plantas vasculares (Rzedowski y Calderón, 1989) y unas 350 especies de vertebrados terrestres (Ceballos y Galindo, 1984; Flores-Villela, 1998). La zona sur es la principal fuente de recarga de los mantos acuíferos de la cuenca, se calcula que 60% del agua que se consume en la Ciudad de México depende de la recarga de los mantos acuíferos de las zonas boscosas que la rodean. Cabe mencionar que la población humana ubicada en esta cuenca se estima en más de 20 millones de personas (Cuevas et al., 2010).



Datos cartográficos

La información cartográfica de uso de suelo y vegetación del Inegi, particularmente de las Series II (año de referencia: 1993), III (año de referencia: 2002), IV (año de referencia: 2007), V (año de referencia: 2011) y VI (año de referencia: 2014) a escala 1:250000 (Tabla 1); disponibles todas en Conabio (2023). Es importante resaltar que posterior al término de este estudio hoy en día se cuenta con la serie VII con año de referencia 2018 (Conabio, 2023), cuya información es importante analizar más adelante para tener un mapa actualizado de las zonas de bosque y su estado de degradación. La elaboración de los conjuntos de datos de las series de Uso del Suelo y Vegetación se ha obtenido a partir de la interpretación de las imágenes multispectrales las cuales son respaldadas por la verificación en campo. Dichas series presentan la distribución de los diferentes tipos de vegetación natural, en su estado original o en sus fases sucesionales, así como vegetación inducida, también se muestra la ubicación de las áreas agrícolas, ganaderas y urbanas. Cabe mencionar que el proceso metodológico para la elaboración de las series es básicamente el mismo, sin embargo, han sufrido modificaciones y adecuaciones considerando el uso de nuevos insumos digitales (imágenes de satélite, ortocorrectificadas, información vectorial tanto temática como de series anteriores) (Inegi, 2015).

La información se descargó en formato vectorial del geoportel de la Conabio (2023), de donde también se extrajo el polígono correspondiente a la Cuenca de México en la sección de Cuencas Hidrográficas de México 2007.

El Inegi ha definido 24 clases de vegetación y uso de suelo. En este estudio se utilizaron 11 de estas clases: (1) bosque de encino; (2) bosque de oyamel; (3) secundaria arbórea de encino; (4) secundaria arbórea de oyamel; (5) secundaria arbustiva de encino; (6) secundaria arbustiva de oyamel; (7) secundaria herbácea de encino; (8) agricultura; (9); pastizal; (10) área urbana y (11) sin vegetación. Cabe mencionar que la definición de los tipos de fases sucesionales (vegetación secundaria) se realizó con base en las formas de vida presentes y su altura (Inegi, 2015).

Análisis multitemporal del uso del suelo y la cobertura vegetal

El cambio de uso del suelo fue evaluado mediante el procedimiento de postclasificación para obtener una matriz de transiciones entre las clases de tipo de suelo y cobertura vegetal (Pontius et al., 2004). Se emplearon dos criterios: la información de las clases de Inegi y la permanencia del tipo de vegetación en el tiempo (desarrollo sucesional) para que fuese consistente a la clasificación de bosques de la OIMT (2002) y el Catie (2016). En primer término, se designó a la clase de bosque de encino y/o bosque de oyamel con la categoría de bosque primario (BPE/BPO), a la clase de vegetación secundaria arbórea (que proviene principalmente del bosque primario) se le asignó la categoría de bosque primario degradado (BPDE/BPDO) y a la clase de vegetación secundaria arbustiva y herbácea (que proviene principalmente de la recuperación de usos de suelo agrícola y pastizal) se le asignó la categoría de bosque secundario (BSE/BSO), por otro lado, las clases de agricultura, pastizal, área urbana y sin vegetación se definieron como tierra forestal degradada (TFD) (Fig. 2).

Los mapas de uso del suelo y vegetación de la Cuenca de México se superpusieron cartográficamente para derivar las tasas y las matrices de transición de los procesos de cambio en cuatro períodos 1993-2002, 2002-2007, 2007-2011, 2011-2014. En todas las series se realizaron las equivalencias entre las categorías de tipos de vegetación. Se utilizó el software ArcGIS 10.2 y herramientas de geoprocésamiento para ese propósito (ESRI, 2012). Una vez calculada la cobertura en hectáreas para cada categoría de uso, en cada período se estimaron tasas de cambio de las coberturas para todo el período y para los períodos parciales utilizando la ecuación 1 (FAO, 1995):

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

donde:

δ = tasa anual de cambio

S_1 = área de la clase de cobertura en el tiempo 1

S_2 = área de la clase de cobertura en el tiempo 2

n = diferencia en años entre los tiempos 1 y 2

TABLA 1. Características generales de las cartas de uso de suelo y vegetación de las series II a VI del Inegi.

	Serie II	Serie III	Serie IV	Serie V	Serie VI
Período de análisis	1995-2000	2002-2005	2007-2010	2011-2014	2015-2017
Año de referencia	1993	2002	2007	2011	2014
Datos fuente	Mapas impresos	LANDSAT TM (30 m)	SPOT 5 (10 m)	LANDSAT 5 TM (30 m)	LANDSAT 8 (30 m)
Información	5 capas	14 capas	13 capas	13 capas	15 capas

Fuente: Inegi, Información de Uso del Suelo y Vegetación escala 1:250 000 (Inegi, 2015)

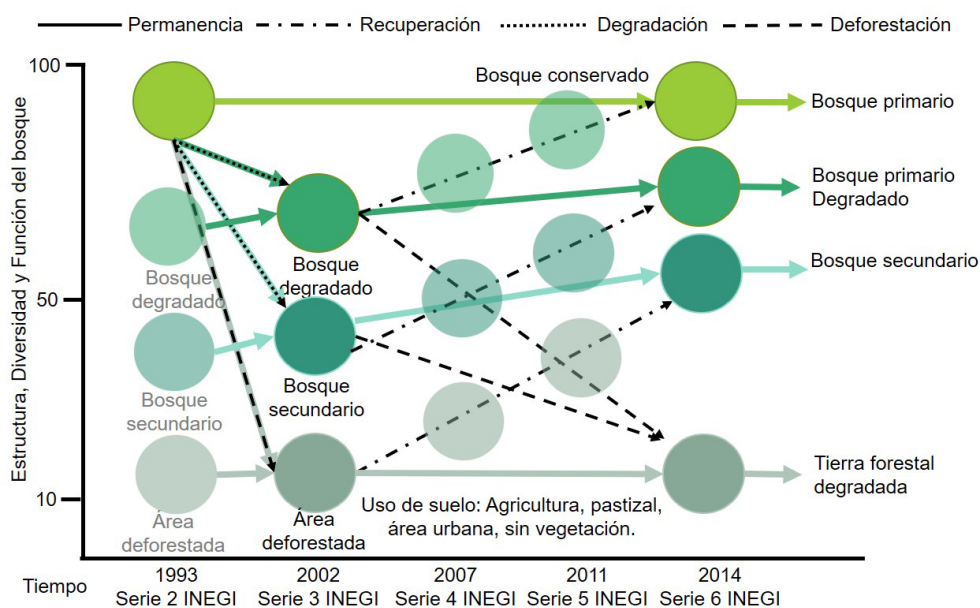


FIGURA 2. Diagrama de transición de los bosques utilizando la información de cambio de uso de suelo.

Adaptado de: Guerra-Martínez et al., 2019; Bradshaw, 1984 y Standish, et al., 2014.

Con la información recabada, se elaboró un mapa de distribución de los bosques de oyamel y encino con diferente grado de degradación.

Análisis de los procesos de cambio de uso del suelo (permanencia, degradación, deforestación y recuperación)

Los procesos de CCUS han modificado la superficie inicial de bosques primarios, dando como resultado una transición a sitios degradados, deforestados o recuperados a lo largo del tiempo. Para cuantificar a detalle estos cambios, se

utilizaron matrices de transición las cuales permiten identificar las áreas que permanecen sin cambio (*permanencia*) o que se transforman en un período determinado (Pontius et al., 2004), por ejemplo, las áreas cuya condición primaria cambió a una secundaria (*degradación*), o las diferentes categorías de tierras forestales que cambiaron a tierras no forestales debido a la expansión de la agricultura y los asentamientos humanos (*deforestación*). A diferencia de otros enfoques de análisis, la matriz de transición muestra las áreas cuya condición secundaria se modifica a una primaria (*recuperación y reforestación*).



Finalmente, se calculó el porcentaje de área que en cada período fue transformada de una clase de uso del suelo o cobertura a otra diferente y se elaboraron diagramas que detallan la tendencia de cambio entre categorías por período y la magnitud de los cambios (porcentaje de cobertura inicial).

RESULTADOS

Dinámica y tasas de cambio de los tipos de cobertura del suelo

Los cambios de cobertura del suelo presentaron tasas diferentes para cada uno de los períodos analizados (Tabla 2). El proceso de cambio de mayor impacto registrado en el bosque primario de oyamel (BPO) durante el período de estudio (1993–2014) fue la degradación, con 973 ha degradadas (-4.2% de la cobertura inicial), con una tasa de cambio anual de -0.21%; el primer período (1993-2002) el que registró la mayor pérdida de la cobertura. De manera contraria, el bosque primario degradado de oyamel (BPDO) aumentó su cobertura en 95 ha (16.9% más de la cobertura inicial) con una tasa de cambio anual de 0.75%, aumentando durante los períodos 1993-2002 y 2011-2014.

El bosque secundario de oyamel (BSO) registró un aumento de cobertura de 1207 ha (72% más de la cobertura inicial) con una tasa de cambio anual de 2.6%, aumentando drásticamente en el primer período (1993-2002), disminuyendo en el período 2007-2011 y volviendo a aumentar para el período 2011-2014. El proceso de cambio con mayor impacto para el bosque primario de encino (BPE) fue la degradación con un total de 4211 ha degradadas (-17% de la cobertura inicial), con una tasa de cambio anual de -0.89%, siendo el primer período 1993-2002 el que registró la mayor pérdida de cobertura. En el caso del bosque primario degradado de encino (BPDE) se encontró que este aumentó de cobertura 197 ha (5.1% de la cobertura inicial), con una tasa de cambio anual de 0.24%. Para la categoría de bosque secundario de encino (BSE) se registró un aumento de la cobertura de 3223 ha (11.9% de la cobertura inicial) con una tasa anual de cambio de 0.54%, siendo el período 2011-2014 el que registró el mayor aumento de cobertura. En lo que respecta a la tierra forestal degradada (TFD) se registró un aumento de 5071 ha en la cobertura de este tipo de suelo (0.70% más que la cobertura inicial), con una tasa de cambio anual de 1.81%, registrando un mayor aumento durante el período 1993-2002 (Tabla 2).

TABLA 2. Coberturas netas, tasas de cambio anuales por períodos y tasas de cambio promedio del período total de la expansión/retracción de la cobertura de los tipos de bosque y usos de suelo para la Cuenca de México.

CCUS períodos	Cobertura (ha)					Tasa anual de cambio (%)				Tasa del período (%)
	Período	1993	2002	2007	2011	2014	1993- 2002	2002- 2007	2007- 2011	2011- 2014
BP Oyamel	22966	22014	22034	22025	21993	-0.53	0.01	-0.01	-0.05	-0.21
BPD Oyamel	560	598	598	598	655	0.84	-0.01	0.00	3.07	0.75
BS Oyamel	1676	2793	2812	2458	2883	6.60	0.11	-3.31	5.46	2.62
BP Encino	24716	20201	20177	20467	20505	-2.49	-0.02	0.36	0.06	-0.89
BPD Encino	3813	4011	3907	3907	4010	0.63	-0.43	0.00	0.87	0.24
BS Encino	27008	27727	26896	26959	30231	0.33	-0.51	0.06	3.89	0.54
TFD	720008	729353	729111	730068	725079	0.26	-0.14	-0.56	-2.14	1.81

BP: bosque primario de oyamel; BPD: bosque primario degradado de oyamel; BS: bosque secundario de oyamel; TFD: tierra forestal degradada.

Distribución espacial de los bosques de oyamel y encino con diferente grado de deterioro de la Cuenca de México

Durante el período de estudio 1993-2014, tomando en cuenta el área total inicial que corresponde a bosque templado de oyamel y encino, se registró una pérdida de 1.0% en la cobertura del bosque primario de oyamel respecto a su extensión original y un aumento de 2.4% de superficie de bosque primario degradado de oyamel. En el caso del bosque primario de encino se registró una mayor disminución, 5.3% menos que su extensión original, aumentando también en 0.3% el bosque primario degradado y 3.8% el bosque secundario respecto a su superficie de inicio. Analizando el total de la cobertura de bosque de encino y oyamel que se encuentra en la Cuenca de México, se registró que existe una mayor cobertura de bosque primario de oyamel (25%-26%) respecto a sus otras dos clases de bosque primario degradado y bosque secundario (1.9%-3.3%). Sin embargo, en el caso del bosque de encino se puede observar que el área que ocupa el bosque primario de encino es menor (28%-23%) con relación a sus categorías con un mayor grado de degradación de bosque secundario de encino (30%-34%). En general, otros tipos de cubiertas del suelo como la agricultura, el pastizal y las zonas urbanas no mostraron una expansión notable (Fig. 3).

Análisis de permanencia, degradación, deforestación y recuperación de coberturas y usos del suelo

Los cambios o transiciones de un tipo de cobertura a otras clases se describen en las figuras 4 y 5. En cada período de análisis (por ejemplo, serie II vs serie III) se indican las hectáreas iniciales por categoría de vegetación y uso de suelo. Las trayectorias se muestran en líneas punteadas indicando el número de hectáreas que se convirtieron de una categoría a otra. El cambio más notable ocurrió en el bosque de oyamel (BPO) durante el período 1993-2002. Esta cobertura se degradó 1057 ha a la categoría de BSO, adicionalmente 523 ha se transformaron (deforestaron) en TFD (Fig. 4a). En el período 1993-2002 el BPDO sufrió

una deforestación menor al perder 23 ha y convertirse también en TFD. Por otro lado, registró también la recuperación de 465 ha que pasaron de la clase TFD a BPO. Otro cambio notable ocurrió en el período 2011-2014 al registrarse la deforestación de 404 ha de BSO, superficie que pasó a formar parte de la categoría TFD (Fig. 4d). Para el caso del bosque de encino, los diagramas de transición muestran que en el período 1993-2002 la cobertura sufrió cambios fuertes. Se deforestaron cerca de 2779 ha de BPE (asignándose a TFD), se degradaron a BPDE 834 ha, y 2022 ha se convirtieron a BSE (Fig. 5a). En ese mismo período (1993-2002), 625 ha de BPDE fueron deforestadas (transitaron a TFD), al igual que 1316 ha de BSE. En el período 2002-2007 resalta el registro de la recuperación de 8479 ha de TFD a BPDE (Fig. 5a).

Respecto al balance de la superficie transformada por tipo de vegetación en relación con los procesos de cambios (recuperación, degradación y deforestación), se encontró que, durante el período completo de análisis (21 años, 1993-2014), el bosque primario de oyamel recuperó 610 ha (~29 ha por año) pero se degradaron 1062 (~50 ha por año) y se perdieron 689 ha (~32 ha por año). Para el caso del bosque primario de encino, durante el período total se recuperaron 2104 ha (~100 ha por año), se degradaron 3370 ha (~160 ha por año) y se perdieron 2773 ha (~132 ha por año; Tabla 3). Un análisis espacial cualitativo indicó una permanencia mayor de los bosques ubicados al suroeste de la Cuenca de México, en áreas con mayor cobertura y continuidad, es decir, un patrón espacial agregado (Fig. 6). También se identificaron zonas que permanecieron sin cambio al sureste de la cuenca, pero con menor conectividad y mayor fragmentación. Las zonas de bosque recuperadas se ubican en mayor parte en el Estado de Hidalgo, hacia el norte de la cuenca de México. La mayor parte de las zonas de deforestación se ubicaron en el Estado de México, al sureste y suroeste de la cuenca. En lo que respecta a zonas de degradación, estas en general se ubicaron en áreas alejadas a la zona urbana, al sur de la cuenca, y otras en áreas alejadas a zonas destinadas a la agricultura ubicadas al norte de la cuenca.

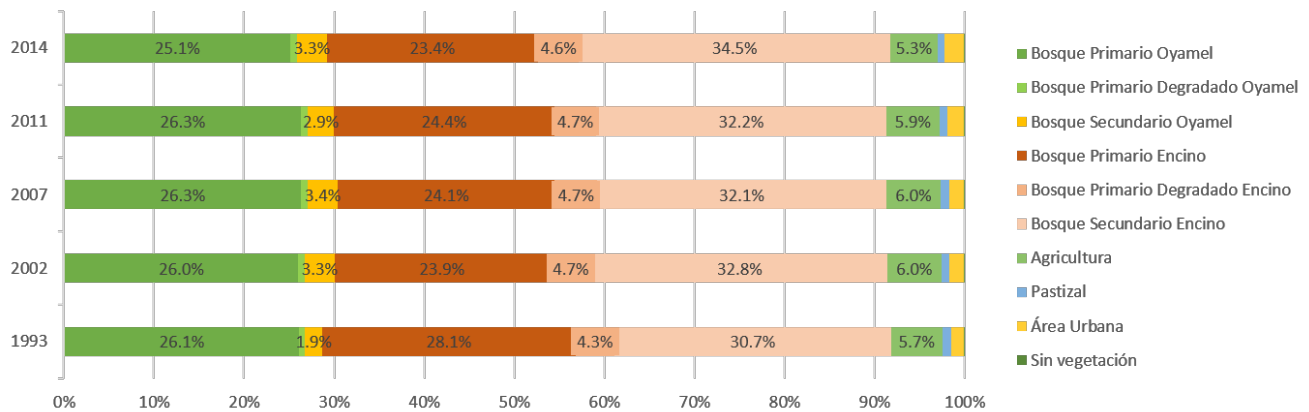
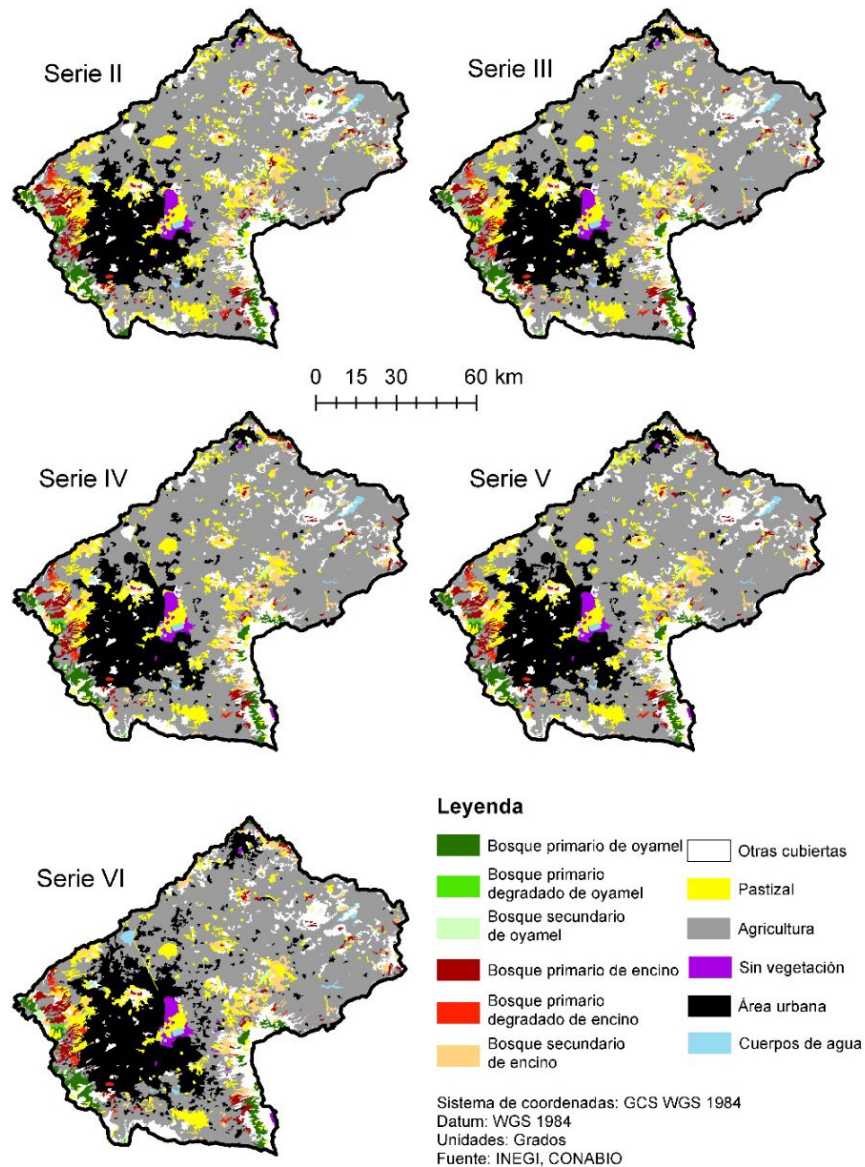


FIGURA 3. Distribución de las coberturas de vegetación y uso del suelo en la Cuenca de México en diferentes fechas (a) y comparativo porcentual de la extensión de cobertura por clase y por período (b). Área de bosque de oyamel y encino inicial = ~88 000 ha. Las categorías y sus porcentajes van de izquierda a derecha en relación con el orden en la leyenda.

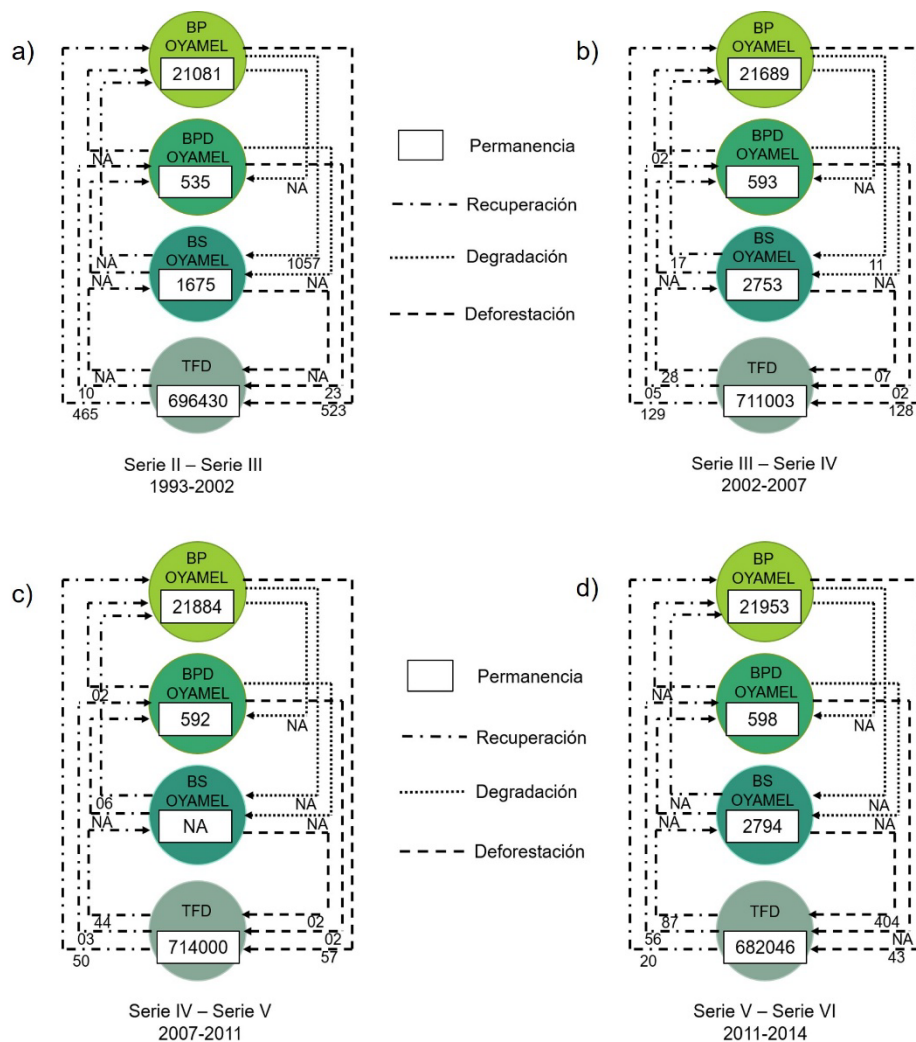


FIGURA 4. Diagrama de transición de los bosques de oyamel para los períodos comprendidos en las series cartográficas de Inegi.

BP: bosque primario de oyamel; BPD: bosque primario degradado de oyamel; BS: bosque secundario de oyamel; TFD: tierra forestal degradada. Los números representan hectáreas y NA los casos que no presentan datos.

TABLA 3. Superficie transformada en el período 1993-2014 por cada proceso de cambio de las coberturas de bosque y usos de suelo (CCUS) para la Cuenca de México.

Cobertura/tiempo	CCUS (ha)		
	Recuperación	Degradación	Deforestación
	21 años		
BP Oyamel	610.8 (29.08)	1062.4 (50.59)	689.8 (32.84)
BPD Oyamel	-	-	-
BS Oyamel	115.7 (5.5)	-	-
BP Encino	2104.3 (100.2)	3370.1 (160.48)	2773 (132.04)
BPD Encino	8492.8 (404.41)	210.06 (10)	808.2 (38.48)
BS Encino	3060.6 (145.74)	-	2033.1 (96.81)

BP: bosque primario de oyamel; BPD: bosque primario degradado de oyamel; BS: bosque secundario de oyamel.

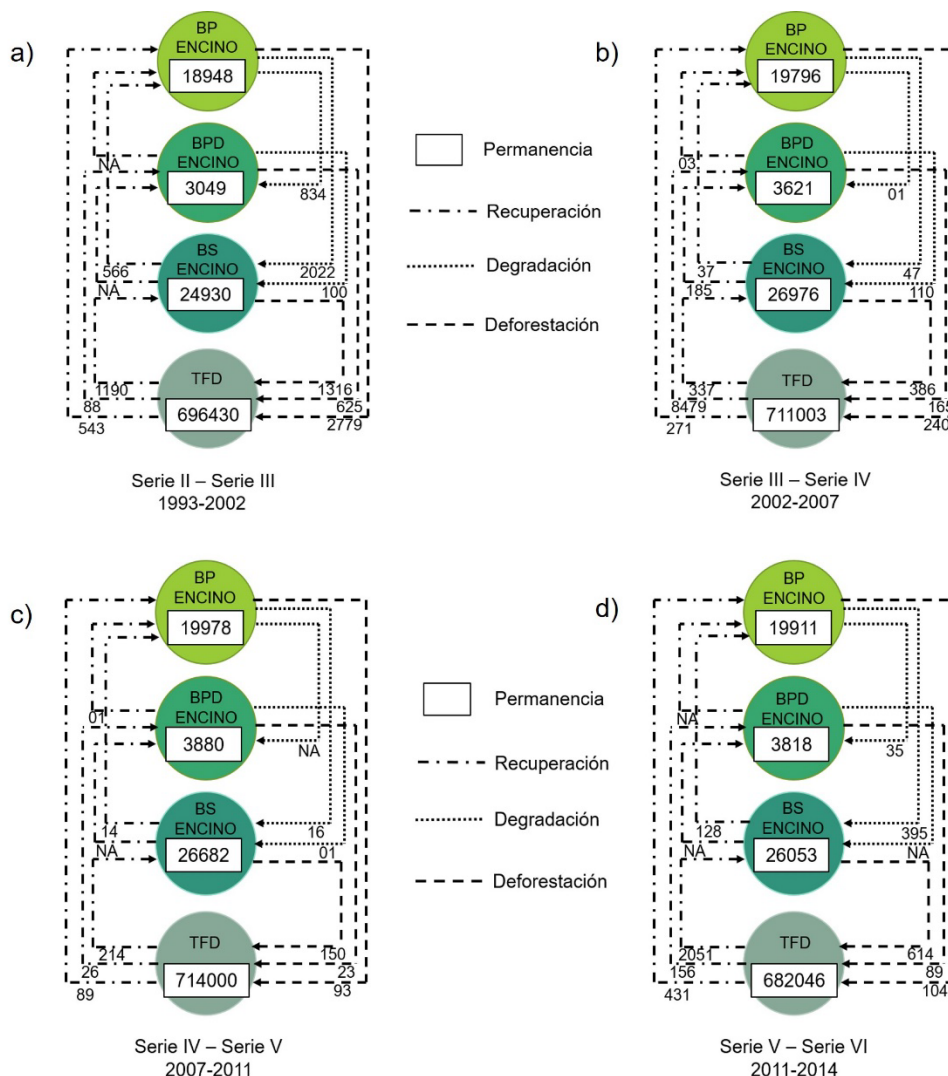


FIGURA 5. Diagrama de transición de los bosques de encino para los períodos comprendidos en las series cartográficas de Inegi.

BP: bosque primario de oyamel; BPD: bosque primario degradado de oyamel; BS: bosque secundario de oyamel; TFD: tierra forestal degradada. Los números representan hectáreas y NA los casos que no presentan datos.

Análisis de trayectorias de cambio de los tipos de cobertura de suelo

La dinámica de cambio entre las coberturas y usos del suelo se puede apreciar en las figuras 7 y 8 donde se representaron las trayectorias y magnitudes de transición. En estos diagramas se observa la conversión en porcentaje de cobertura hacia otros tipos de uso del suelo y vegetación. Para el bosque primario de encino la conversión a uso agrícola aumentó en el primer período (13.8% de su cobertura total) y para el bosque primario degradado cerca

de 20% de su cobertura total, disminuyendo su conversión a uso agrícola en los siguientes períodos (menos de 1.0%). Solo en el período 2002-2007, se observó una deforestación del bosque primario degradado sufriendo una conversión a áreas urbanas de 2.4% de su cobertura. En el período 2002-2007 se registró una recuperación del bosque de 1.2% del área que no tenía vegetación convirtiéndose en bosque primario degradado (Fig. 7). Para el caso del bosque de oyamel, se observó deforestación y conversión hacia uso agrícola (4.4%) y

pastizal (1.9%) en el primer período; sin embargo, en términos de porcentaje en los períodos siguientes no se observaron conversiones notables a otros usos de suelo. En relación con la recuperación, esta se observó en dos

períodos consecutivos 2002-2007 y 2007-2011 con una aportación de 0.5% del bosque primario degradado y del bosque secundario hacia bosque primario (Fig. 8).

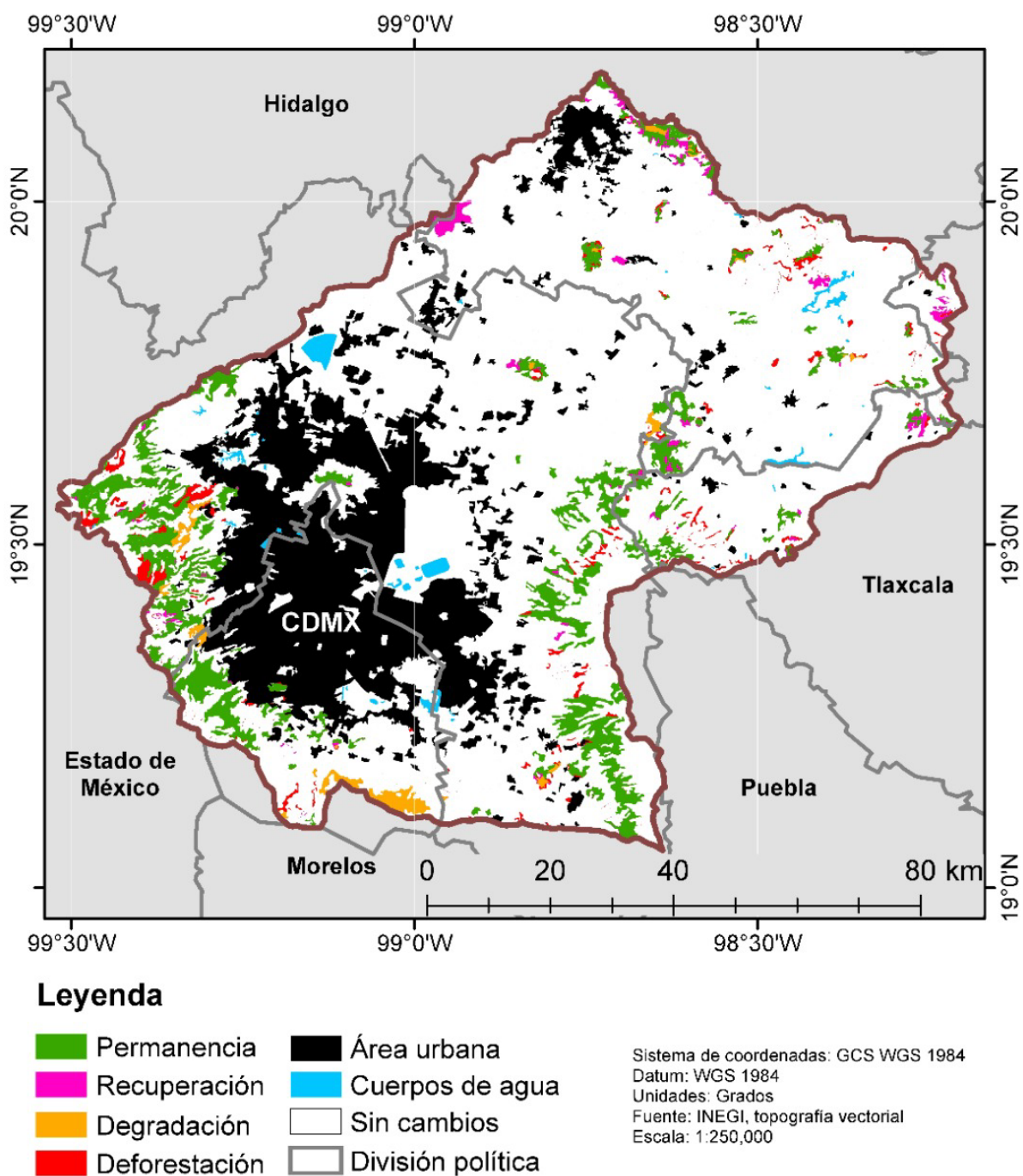


FIGURA 6. Áreas de permanencia, recuperación, degradación y deforestación en la Cuenca de México para el período 1993-2014.

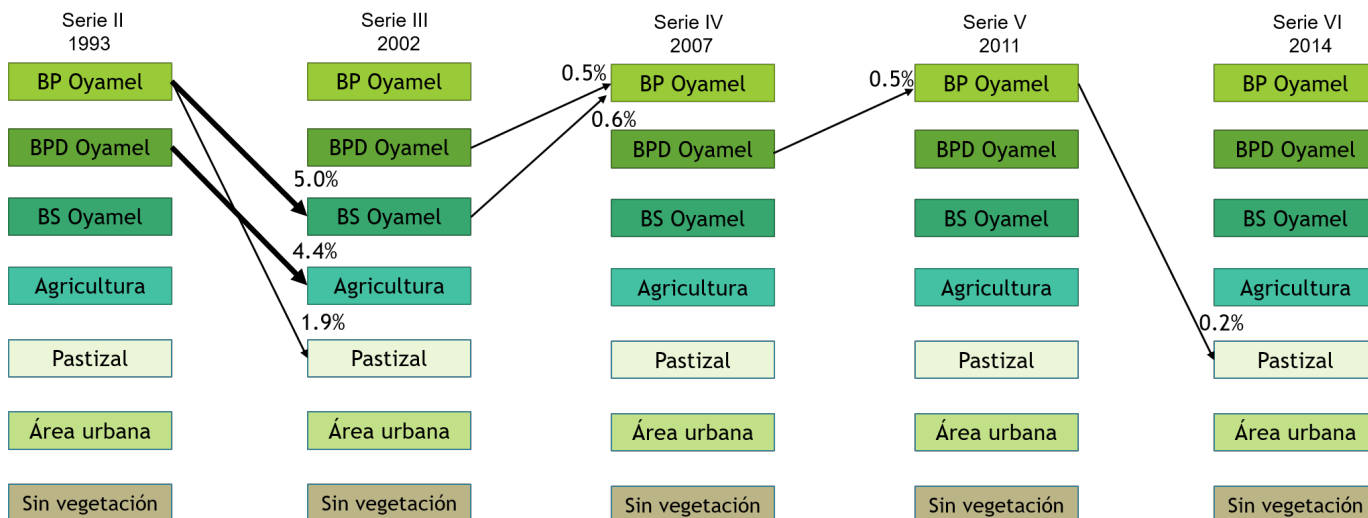


FIGURA 7. Trayectorias y magnitud del cambio de cobertura del bosque de la Cuenca de México.

Se muestra el porcentaje del área inicial de cada categoría por período de transición del bosque de encino.

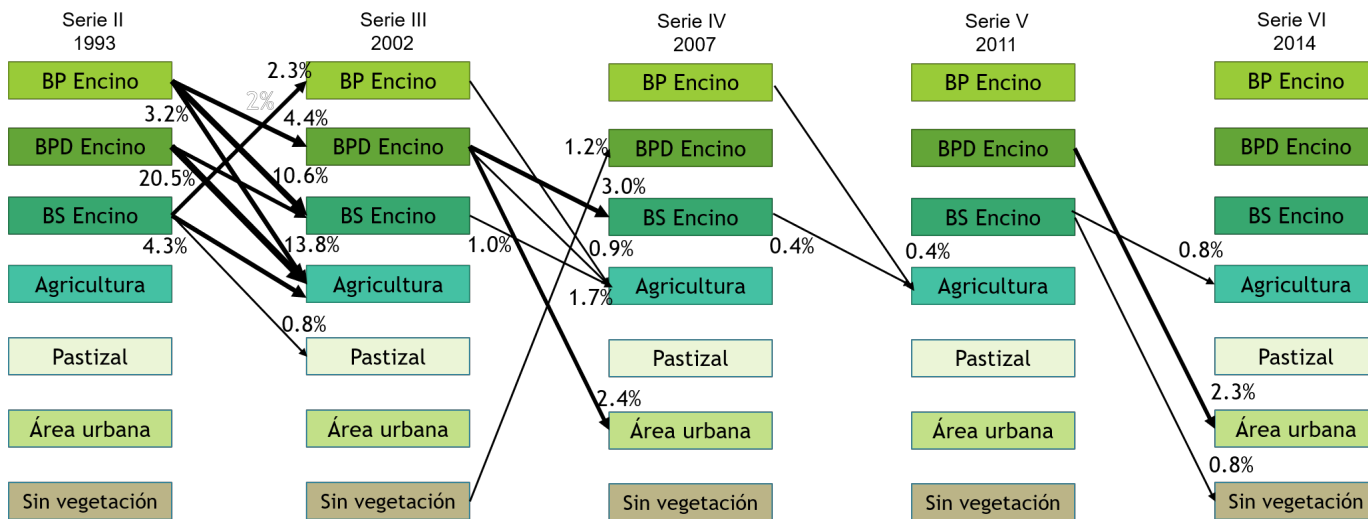


FIGURA 8. Trayectorias y magnitud del cambio de cobertura del bosque de la Cuenca de México.

Se muestra el porcentaje del área inicial de cada categoría por período de transición del bosque de oyamel.

DISCUSIÓN

En general, el análisis de cambio de la cobertura del suelo en la Cuenca de México durante el período de estudio (1993-2014) revela que ha existido una reducción de la cobertura inicial de los bosques primarios y un aumento de cobertura de los bosques degradados y secundarios. Los cambios en la cobertura del suelo no ocurrieron a tasas iguales durante todos los intervalos de tiempo (Tabla 2).

Cabe mencionar que durante el primer período 1993-2002 se registró un proceso fuerte de degradación de los bosques primarios a diferencia de otros períodos, siendo mayor la degradación del bosque de encino (-18%) en comparación con el bosque de oyamel (-4%). A lo largo del período se estimó una tasa anual de cambio negativa para el bosque de encino (-0.89%) y una tasa de cambio positiva para el bosque de oyamel (0.21%) (Tabla 2). Esto concuerda con

lo registrado por Conafor (2020), a escala nacional en los años 1993 y 2002, donde alrededor de 2.8 millones de hectáreas cambiaron de ser bosques, selvas, matorrales y pastizales para convertirse en otro uso, a un ritmo de cerca de 306 mil hectáreas al año.

Los ecosistemas más afectados fueron selvas, matorrales y bosques templados (con pérdidas, en millones de hectáreas, de alrededor de 1.3, 0.95 y 0.37, respectivamente). Si toda el área que originalmente pertenecía a bosques de encino y oyamel desde 1993 en la Cuenca de México fuera la referencia inicial, se puede observar una tendencia comparando los resultados de las categorías de uso de suelo con los subsecuentes períodos (Fig. 3).

El análisis realizado refleja claramente la reducción de los bosques primarios y el aumento en los bosques degradados, incluso brinda una mejor visión de la proporción de estos respecto a los primeros; por ejemplo, en el caso del bosque de oyamel, aunque existe una pérdida del bosque primario, la proporción de área para sus categorías con un grado de deterioro fueron menores (de 25%-26% de bosque primario en relación con 1.9%-3.3% de bosque secundario). Sin embargo, en el caso del bosque de encino, la proporción de sus categorías con algún grado de deterioro es mayor (de 23%-28% de bosque primario en relación con 30%-34% de bosque secundario). Lo anterior indica que existe una proporción de cobertura de bosque secundario de encino mayor a la que corresponde a un bosque primario de encino.

Los procesos de cambio identificados en los diagramas de transición de ambos tipos de vegetación sugieren que los dos bosques, en su categoría de primarios, parten de una cobertura inicial muy parecida, correspondiendo 21 000 ha al bosque de oyamel y 19 000 ha a bosque de encino.

La degradación fue el proceso más frecuente que ha incrementado la cobertura de las otras categorías de cobertura en ambos casos (Fig. 4 y 5). El bosque primario de oyamel presentó degradación y deforestación mayor en el primer período de análisis (1993-2002), convirtiéndose aproximadamente 1000 ha en bosque secundario y 500 ha en tierra forestal degradada (convertida en otro uso de suelo: agricultura, pastizal, área urbana y sin vegetación). En

los siguientes períodos no se observaron cambios notables en los procesos de degradación y deforestación; este resultado es interesante, sin embargo, es importante notar que la extensión de los períodos analizados es diferente. El primer período consta de nueve años de cambios del uso de suelo mientras que los subsecuentes períodos analizados son más cortos (cinco, cuatro y tres años).

De la figura 4 fue posible deducir la recuperación de una superficie de 465 ha del bosque de oyamel en el primer período analizado, sin embargo, la ruta de transición lo ubica en bosque primario de oyamel, lo cual ecológicamente puede ser cuestionable. Para el caso del bosque primario de encino, la degradación forestal fue mayor a la registrada en el bosque de oyamel. En el primer período, cerca de 3000 ha transitaron a categorías degradadas de vegetación (bosque primario degradado y bosque secundario) (Fig. 5).

La deforestación también fue un proceso que aumentó de intensidad en este período pues cerca de 5000 ha de bosque fueron transformadas a otro uso de suelo (agricultura, pastizal, área urbana y sin vegetación). Sin embargo, también se registró un proceso de recuperación de tierra forestal degradada, con aproximadamente 1200 ha hacia bosque secundario y 500 ha para bosque primario degradado; esta información debe ser analizada pues, de igual forma, ecológicamente puede ser cuestionable o debido a prácticas de reforestación.

En el segundo período de análisis (2002-2007) se redujo la degradación del bosque de encino en comparación con el primer período, sin embargo, existe una recuperación muy notable de la tierra forestal degradada hacia otros tipos de vegetación, siendo cerca de 8500 ha las que transitaron a la categoría de bosque primario degradado. Cabe mencionar que en los períodos siguientes (2007-2011 y 2011-2014) no se observaron cambios notables en la degradación o deforestación del bosque de encino, por lo tanto, se observa una disminución en el deterioro de este tipo de bosque; inclusive se registró una recuperación de aproximadamente 2500 ha.

En las zonas montañosas los cambios fueron menos frecuentes y consistieron en la conversión de bosques



primarios a secundarios, sin embargo, en los valles la agricultura fue una actividad que impulsó la degradación de los bosques, particularmente de encinos. Esto se debe a que entre las principales formas de uso de los ecosistemas montañosos de la Cuenca de México se encuentran los sistemas de rotación, policultivos y sistemas de producción en terrazas (Palma et al., 2001). Además, se encontró que la zona periurbana también presentó un grado de deforestación alta del bosque de encino debida a la rápida expansión de áreas urbanas en el período 2002-2007. En estas zonas conviven grupos indígenas autóctonos, campesinos mestizos y pobladores netamente urbanos cuyos asentamientos disminuyen paulatinamente las zonas naturales que son reemplazadas por pavimento y concreto (Palma et al., 2001). Este panorama es similar al que se ha encontrado en la mayoría de las cuencas de México. Cuevas et al. (2010) establecieron que, entre 1976 y 2009, 80% de las cuencas perdieron entre 1% y 20% de su vegetación natural, mientras que 12 cuencas situadas principalmente en el Golfo de México perdieron 80%. Los mismos autores señalan que la pérdida masiva de cobertura vegetal en casi todos los ecosistemas forestales es provocada principalmente por la deforestación (Villanueva-Manzo, 2002). En la región de estudio, los patrones de permanencia del bosque están caracterizados por una topografía que limita el uso intensivo por actividades humanas, sin embargo, se puede apreciar una degradación continua de estas zonas convirtiéndolas en bosques primarios degradados e incluso en bosques secundarios, posiblemente impulsado por la presión del pastoreo, la recolección de leña y la producción de carbón vegetal. Las repercusiones de estas actividades no se han cuantificado en la Cuenca de México, pero algunos estudios mencionan que su impacto sobre la cubierta vegetal no debe ser subestimada (Dubroeuq y Livenais, 2004). Estas actividades han afectado los procesos necesarios para la recuperación del bosque pues puede estar limitada por la erosión y compactación del suelo, falta de banco de semillas, alteración por incendios inducidos por el ser humano y capacidades de regeneración limitadas de especies forestales en comparación con especies de arbustos e incluso invasión de malezas o especies exóticas.

La prevalencia de la superficie de bosque secundario, particularmente en el bosque de encino, sobre la superficie de bosque primario sugiere implementar estrategias urgentes de restauración para la recuperación de la estructura, composición y función de este tipo de bosque para recobrar sus servicios ecosistémicos. Por otro lado, en el estudio se registró una recuperación de ambos tipos de bosques a través de la sucesión de un total de 14 381 ha, es decir, 16.34% del área de estudio, no obstante, es necesario identificar las condiciones ecológicas de estas áreas recuperadas. En este sentido, cabe mencionar que dentro de las guías para la interpretación cartográfica del Inegi, de las series utilizadas, el concepto de vegetación secundaria se basa en la identificación de tres fases en relación con las formas de vida presentes y su altura: a) vegetación secundaria herbácea; b) vegetación secundaria arbustiva y c) vegetación secundaria arbórea. Solo accediendo a los sitios de verificación en campo del Inventario Nacional Forestal y de Suelos con información detallada de la composición y riqueza de especies será posible un mejor entendimiento del proceso de sucesión ecológica. Un análisis con un conocimiento ecológico más profundo servirá como apoyo para la caracterización de la vegetación secundaria dada la enorme variedad de condiciones ecológicas, la heterogeneidad florística y su interpretación en campo para desarrollar mecanismos de clasificación de la vegetación a través de sensores remotos (Inegi, 2015).

Los cambios o transiciones de la cobertura de bosques dieron como resultado los siguientes patrones espaciales que explican en gran parte la alta dinámica detectada en los paisajes estudiados: a) intercambios entre bosques y agricultura mayormente en zonas de bosque de encino caracterizados por ubicarse en altitudes menores y en terrenos más planos ocasionando un patrón de pequeños parches, sin embargo, esta deforestación alcanzó al bosque de oyamel caracterizado por presentarse en laderas y a una mayor altitud; b) aumento de la cobertura de bosques secundarios, tanto por una degradación paulatina de los bosques primarios, como por la recuperación de zonas de cultivo o urbanas abandonadas y, finalmente, por la cercanía a asentamientos humanos; y c) pérdida neta de

bosques primarios y parches continuos relativamente grandes. Esto concuerda con el estudio realizado por Cuevas et al. (2010), quienes mencionan que el grado de conectividad de la vegetación primaria y secundaria es bajo. Los resultados de este estudio pueden tener influencia en la planeación de estrategias de conservación, con la implementación de corredores biológicos como medio para alcanzar una mayor conectividad entre parches de bosques, facilitando el flujo de organismos y aumentando con el tiempo el tamaño del hábitat como una solución a la fragmentación (Hilty et al., 2006).

Finalmente, la pérdida, degradación y fragmentación de la vegetación de una cuenca hidrográfica reduce la funcionalidad y aumenta la vulnerabilidad de esta, ya que condiciona la capacidad de los ecosistemas de dar soporte, fungir como hábitat de distintas especies, de mantener los ciclos biogeoquímicos, de cumplir con sus funciones hídricas, así como de resistir disturbios (Forman y Godron, 1986, Millenium Ecosystem Assessment [MEA], 2005). Por lo tanto, la degradación continua de la cubierta vegetal podría tener un impacto fuerte en el bienestar humano ya que hay una creciente demanda de agua para la Ciudad de México y el Área Metropolitana que están inmersos en la Cuenca de México. Los problemas ambientales como la degradación, la pérdida de la biodiversidad y la disminución de la productividad se acumulan a lo largo del tiempo y tienen efectos no lineales en escalas regionales y globales (Schulz et al., 2010). Por ello es necesario implementar estrategias para optimizar la configuración espacial de los usos del suelo y la restauración de la cubierta forestal debe planearse cuidadosamente para restablecer las funciones del hábitat, considerando establecer zonas de amortiguamiento y corredores entre el bosque secundario y el bosque primario detectado en este estudio (Gutiérrez et al., 2007). La restauración ecológica es una actividad muy costosa y conlleva procesos a largo plazo, por ello es importante generar criterios que permitan priorizar sitios en el paisaje donde la restauración es urgente y factible y tendrá más impacto. En este sentido, se sugiere que la restauración debe considerar llevar a cabo encuestas socioeconómicas para obtener información acerca de las funciones y

expectativas de los poseedores de tierras y/o los usuarios de los bosques para proponer técnicas viables de restauración sustentable de los bosques acordes con las necesidades locales (OIMT, 2002).

CONCLUSIONES

El análisis de cambio de la cobertura del suelo en la Cuenca de México durante el período de estudio (1993-2014) revela que ha existido una reducción de la cobertura inicial de los bosques primarios y un aumento de cobertura de los bosques degradados y secundarios. Los resultados indicaron que durante el período 1993-2002 se registró una mayor degradación de los bosques primarios, siendo mayor la degradación del bosque de encino (-18%) en comparación con el bosque de oyamel (-4%), con una tasa anual de cambio negativa para el bosque de encino (-0.89%) y una tasa anual de cambio negativa para el bosque de oyamel (-0.21%). Respecto al balance de la superficie transformada por tipo de vegetación –en relación con los procesos de cambios (recuperación, degradación y deforestación)– se encontró que, durante el período completo de análisis (21 años, 1993-2014), el bosque primario de oyamel recuperó 610 ha (~29 ha por año), pero se degradaron 1062 (~50 ha por año) y se perdieron 689 ha (~32 ha por año). Para el caso del bosque primario de encino durante el período total se recuperaron 2104 ha (~100 ha por año), se degradaron 3370 ha (~160 ha por año) y se perdieron 2773 ha (~132 ha por año). Este análisis mostró cómo la cubierta vegetal de los bosques de encino y oyamel se ha ido degradando con el paso del tiempo; sin embargo, también muestra la recuperación debido a la revegetación pasiva que contrarresta en parte la pérdida de vegetación. A medida que los pobladores locales sean conscientes de los beneficios que proporcionan los bosques y las consecuencias de sus pérdidas se podrá revertir el deterioro. Finalmente, la investigación de la dinámica regional proporciona una base para el análisis futuro de los impulsores y las circunstancias que mejoran el cambio o la estabilidad de la cobertura vegetal. Además, las trayectorias de cambio proporcionan un componente crítico para el uso



del suelo, la conservación y la planificación de la restauración en cualquier paisaje.

RECONOCIMIENTOS

El primer autor agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por el Programa de Becas de Estancias Posdoctorales y al Programa del Posgrado receptor de la Maestría en Ciencias Forestales del Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco. El tercer autor agradece el apoyo otorgado del Programa de Apoyo a Proyectos para Innovar y Mejorar la Educación UNAM-DGAPA-PAPIME PE303822.

REFERENCIAS

- Bradshaw, A. D. (1984). Ecological principles and land reclamation practice. *Landscape Planning*, 11(1), 35-48. [https://doi.org/10.1016/0304-3924\(84\)90016-9](https://doi.org/10.1016/0304-3924(84)90016-9)
- Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza [Catie] (2016). *Definición de bosques secundarios y degradados en Centroamérica*. Documentos de trabajo. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. <https://www.forestryandclimate.com/wp-content/uploads/2017/10/170918-Definition-Forest-Catie-Final-Spanish-version-electronic-version.pdf>
- Ceballos, G., & Galindo, C. (1984). *Mamíferos silvestres de la cuenca de México*. Limusa.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad [Conabio] (2023). *Portal de Geoinformación 2023*. Vegetación y uso del suelo. INEGI. http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis_root/usb/inegi/usb250ks2gw
- Comisión Nacional Forestal [Conafor] (2020). *El sector forestal mexicano en cifras 2019: Bosques para el bienestar social y climático*. Semarnat-Conafor. <https://www.gob.mx/conafor/documentos/el-sector-forestal-mexicano-en-cifras-2019>
- Cuevas, M. L., Garrido, A., Pérez, J. L., & González, D. I. (2010). Estado actual de la vegetación en las cuencas de México. En H. Cotler (Coord.), *Las cuencas hidrográficas de México: Diagnóstico y priorización* (pp. 50-59). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales e Instituto Nacional de Ecología.
- Chazdon, R. L. (2008). Beyond deforestation: restoring forests and ecosystem services on degraded lands. *Science*, 320(5882), 1458-1460. <https://doi.org/10.1126/science.1155365>
- Dubroeuq, D., & Livenais, P. (2004). Land cover and land use changes in relation to social evolution – a case study from Northern Chile. *Journal of Arid Environments*, 56(2), 193–211. [https://doi.org/10.1016/S0140-1963\(03\)00042-9](https://doi.org/10.1016/S0140-1963(03)00042-9)
- ESRI. (2012). ArcGis, Ver. 10.1 SP1 for Desktop.
- Food and Agriculture Organization [FAO] (1995). *Forest resources assessment 1990 - Global synthesis*. <http://www.fao.org/3/v5695e/V5695E00.htm>
- Food and Agriculture Organization [FAO] (2009). *Hacia una definición de degradación de los bosques: análisis comparativo de las definiciones existentes*. Documento de trabajo. <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=XF2009440931>
- Food and Agriculture Organization [FAO] (2015). *Global forest resources assessment 2015*. FAO Forestry paper No. 1. <http://www.fao.org/resources/infographics/infographics-details/en/c/325836/>
- Food and Agriculture Organization [FAO] (2020). *Global forest resources assessment 2020: Main report*. <https://doi.org/10.4060/ca9825en>
- Food and Agriculture Organization and United Nations Environment Programme [FAO and Unep] (2020). *The state of the world's forests 2020. Forests, biodiversity and people*. <https://doi.org/10.4060/ca8642en>
- Forman, R. T. T., & Godron, M. (1986). *Landscape ecology*. John Wiley and Sons.
- Flores-Villela, O. (1998). Herpetofauna de México: distribución y endemismos. En T. P. Ramamoorthy, R. Bye, A. Lot y J. Fa (Eds.), *Diversidad biológica de México. Orígenes y distribución* (pp 251-278). Instituto de Biología, UNAM.
- Gottret, M. V., & Stoian, D. (2017). *Avanzando hacia el desarrollo de cadenas de valor inclusivas y sostenibles*. Catie. <http://agronegocios.catie.ac.cr/images/pdf/avanzando%20hacia%20el%20desarrollo%20de%20cadenas%20de%20valor%20inclusivas%20y%20sostenibles.pdf>
- Guerra-Martínez, F., García-Romero, A., Cruz-Mendoza, A., & Osorio-Olvera, L. (2019). Regional analysis of indirect factors affecting the recovery, degradation and deforestation in the tropical dry forests of Oaxaca, Mexico. *Singapore Journal of Tropical Geography*, 40(3), 387-409. <https://doi.org/10.1111/sjtg.12281>
- Gutiérrez, J. R., Holmgren, M., Manrique, R., & Squeo, F. A. (2007). Reduced herbivore pressure under rainy ENSO conditions could facilitate dryland reforestation. *Journal of Arid Environments*, 68(2), 322–330. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2006.05.011>
- Hilty, J., Lidicker, W., & Merenlender, A. (2006). *Corridor ecology: the science and practice of linking landscapes for biodiversity conservation*. Island Press.

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [Inegi] (2015). *Guía para la interpretación de cartografía: uso del suelo y vegetación: escala 1:250, 000: serie VI*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México. http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825092030.pdf
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [Inegi] (2018). *Uso del suelo y vegetación: escala 1:250, 000: serie VII*. En: Portal de Geoinformación 2023. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis_roo_t/usv/inegi/usv250ks2gw
- Jáuregui, E. (1995). Algunas alteraciones de largo periodo del clima de la Ciudad de México debidas a la urbanización: Revisión y perspectivas. *Investigaciones Geográficas*, 31, 9-44. <https://doi.org/10.14350/ig.59035>
- Millenium Ecosystem Assessment [MEA] (2005). *Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and human well-being. Current state and trends*. Island Press.
- Laestadius, L., Saint-Laurent, C., Minnemeyer, S., & Potapov, P. (2011). *A world of opportunity: the world's forests from a restoration perspective*. Asociación Global sobre Restauración del Paisaje Forestal. http://pdf.wri.org/world_of_opportunity_brochure_2011-09.pdf.
- Organization Internacional de Maderas Tropicales [OIMT] (2002). *Criterios e indicadores para la ordenación sostenible de los bosques naturales*. Ministerio del Medio Ambiente, Bogotá. <https://guao.org/sites/default/files/biblioteca/Criterios%20%20e%20indicadores.pdf>
- Oliver, C. D., & Larson, B.C. (1996). *Forest stand dynamics*. John Wiley & Sons. Inc.
- Pontius, R.G., Shusas, E., & McEachern, M. (2004) Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 101(2-3), 251-68. <http://doi:10.1016/j.agee.2003.09.008>
- Palma, M., Romero, F., & Velázquez, A. (2001). La cuenca de México: una revisión de su importancia biológica. *Biodiversitas*, 37, 12-14.
- Rodríguez, L., & Morales, J. A. (2013). Integración de un sistema de cuentas económicas e hídricas en la Cuenca del Valle de México. *Realidad Datos y Espacio*, 4(1), 72-89.
- Rzedowski, J. (1978). *Vegetación de México*. Editorial Limusa, Noriega.
- Rzedowski, J., & Calderón, G. C. (1989). Sinopsis numérica de la flora fanerogámica del Valle de México. *Acta Botanica Mexicana*, 8, 15-30. <https://doi.org/10.21829/abm8.1989.583>
- Simula, M., & E. Mansur. (2011). Un desafío mundial que reclama una respuesta local. *Unasylva*, 62(2), 3-7. <http://www.fao.org/3/i2560s/i2560s01.pdf>
- Schulz, J. J., Cayuela, L., Echeverría, C., Salas, J., & Rey-Benayas, J. M. (2010). Monitoring land cover change of the dryland forest landscape of Central Chile (1975-2008). *Applied Geography*, 30(3), 436-447. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2009.12.003>
- Villanueva-Manzo, J. (2002). *Microcuencas*. Universidad Autónoma Chapingo.
- Potapov, P., Yaroshenko, A., Turubanova, S., Dubinin, M., Laestadius, L., Thies, C., Aksenov, D., Egorov, A., Yesipova, Y., Glushkov, I., Karpachevskiy, M., Kostikova, A., Manisha, A., Tsybikova, E., & Zhuravleva, I. (2008). Mapping the world's intact forest landscapes by remote sensing. *Ecology and Society*, 13(2), 51. <http://www.ecologyandsociety.org/vol13/iss2/art51/>

Manuscrito recibido el 08 de febrero de 2021

Aceptado el 03 de enero de 2023

Publicado el 13 de abril de 2023

Este documento se debe citar como:

Santibáñez-Andrade, G., Valdez-Lazalde, J. R., & Guerra-Martínez, F. (2023). Análisis multitemporal de la degradación de los bosques de encino y oyamel en la Cuenca de México (1993-2014). *Madera y Bosques*, 29(1), e2912323. <https://doi.org/10.21829/myb.2023.2912323>



Madera y Bosques por Instituto de Ecología, A.C. se distribuye bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercialCompartirIgual 4.0 Internacional.