

Intensidad en los cambios de uso de suelo en México (2001-2018)

Intensity of land use change in Mexico (2001-2018)

Leticia Citlaly López-Teloxa* y Alejandro Ismael Monterroso-Rivas**

Recibido: 18/03/2024. Aceptado: 25/09/2024. Publicado: 05/11/2024.

Resumen. El estudio de las transformaciones del paisaje y el uso del suelo es esencial para abordar desafíos ambientales como la desertificación, la pérdida de biodiversidad y el calentamiento global. En México, las tasas de deforestación han fluctuado entre el 1% y el 8% anualmente, siendo alarmante la conversión de bosques en tierras agrícolas y urbanas, lo que afecta negativamente la vegetación natural.

Aunque existen investigaciones regionales que analizan cambios en el uso del suelo mediante diversas metodologías, no se han realizado estudios a nivel nacional que evalúen la intensidad de estos cambios. El objetivo de este trabajo busca realizar un análisis de intensidad del cambio de uso del suelo, considerando la rapidez de los cambios, la permanencia de las categorías de uso y las transiciones entre coberturas, especialmente de áreas forestales.

La hipótesis del estudio es que el método de análisis de intensidad puede identificar áreas vulnerables a cambios y revelar dinámicas que impulsan la deforestación. Los resultados proporcionarán información valiosa para la planificación territorial, la restauración de ecosistemas y la promoción de prácticas agrícolas sostenibles, siendo crucial para el manejo eficaz de los recursos naturales en México.

Materiales y métodos. El estudio se llevó a cabo en tres etapas: obtención y procesamiento de cartografía de usos de suelo, análisis de la intensidad de los cambios de uso de suelo (intensidad, permanencia y transición) y pruebas de autocorrelación del paisaje.

Cartografía y datos. Se utilizaron seis series oficiales de uso de suelo del INEGI (2001-2018) a escala 1:250,000, clasificando la vegetación en 20 categorías según la CNUDL. Cada cobertura se convirtió a formato ráster de 1 km x 1km,

resultando en un total de 1,959,248 píxeles, excluyendo aquellos no cartografiados.

Intensidad en el cambio de uso de suelo. El análisis de intensidad considera la extensión y rapidez del cambio. Se empleó el marco matemático de Aldwaik y Pontius para comparar intensidades observadas con una intensidad media uniforme. Se analizaron seis intervalos de tiempo: 2001-2005, 2005-2009, 2009-2013, 2013-2016, 2016-2018 y 2001-2018, generando matrices de transición que permiten evaluar cambios en el uso de la tierra. El análisis se realizó en R y ArcGIS®.

Tamaño e intensidad del cambio. Se calculó el tamaño y la intensidad del cambio anual en cada intervalo, determinando si el cambio fue rápido o lento.

Permanencia de categorías. Se evaluó la variación en ganancias y pérdidas entre categorías, clasificando los cambios como activos o inactivos según su intensidad.

Transición entre categorías. Se analizó la transición entre categorías para determinar el tamaño e intensidad de cambios entre ellas, estableciendo si una categoría tendía a expandirse o contraerse.

Análisis de autocorrelación del paisaje. Se combinó un análisis cuantitativo y visualización cartográfica para estudiar la evolución del paisaje en 20 años, utilizando el análisis de Moran local univariado para evaluar la autocorrelación espacial. Esto resultó en un mapa LISA, que muestra la concentración y diferenciación de cambios en el paisaje a nivel local.

Resultados y discusión. Se identificaron patrones significativos de deforestación y transformación del paisaje, destacando que aproximadamente el 40% de la superficie

* División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.5 Carretera México-Texcoco, CP. 56230. Texcoco, Estado de México, México. ORCID: 0000-0002-0258-325X. Email: al2300036p@chapingo.mx

** Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.5 Carretera México-Texcoco, CP. 56230. Texcoco, Estado de México, México. ORCID: 0000-0003-4348-8918. Email: amonterrosor@chapingo.mx. Autor de correspondencia.

nacional ha experimentado algún tipo de cambio en el uso del suelo.

Los resultados revelan que la deforestación ha sido particularmente pronunciada en áreas donde la expansión urbana y las actividades agropecuarias han aumentado. Se observó una pérdida del 10% de la cobertura forestal, mientras que la vegetación de matorrales y pastizales se mantuvo relativamente estable, aunque también sufrió una reducción del 4%. Las áreas de alta intensidad de cambio se localizaron principalmente en el sur de México, donde la presión por el desarrollo urbano es más intensa, en contraste con el norte, que mostró una menor intensidad de cambio.

El análisis también destacó la variabilidad en las categorías de uso de suelo, principalmente de “asentamientos humanos” mostrando aumentos significativos. Esto sugiere que las dinámicas socioeconómicas y las políticas de desarrollo han influido en la transformación del paisaje.

Conclusiones. En el apartado de conclusiones, se destaca que la aplicación de la metodología de intensidad de cambio de Aldwaik y Pontius ha permitido una comprensión profunda de la dinámica del uso del suelo y la cobertura vegetal en México a lo largo de seis intervalos de tiempo entre 2001 y 2018. Se concluye que la pérdida de cobertura forestal es un fenómeno significativo, con un 10% de reducción, mientras que otras categorías de vegetación han mostrado cambios menores.

Se enfatiza la necesidad de un seguimiento continuo y sistemático de la cartografía de uso de suelo a nivel nacional para identificar tendencias de deforestación, urbanización y cambios en la cobertura vegetal. Esto es crucial para la toma de decisiones informadas en políticas de conservación y manejo sostenible de los recursos naturales. Además, se sugiere que futuros estudios deben considerar la verificación de información en campo para mejorar la precisión de los análisis sobre la intensidad del cambio de uso de suelo.

Palabras clave: usos de la tierra, cubierta vegetal, degradación de tierras, transformación forestal.

Abstract. The study of landscape and land-use transformations is essential to address environmental challenges such as desertification, loss of biodiversity, and global warming. In Mexico, annual deforestation rates have fluctuated between 1 % and 8 %, with alarming conversion of forests into agricultural and urban land, negatively affecting natural vegetation.

Previous research has analyzed changes in land use at regional levels using various methodologies; however, no studies have evaluated the intensity of these changes at the national level. This work analyzed the intensity of land-use changes considering the rate of change, the permanence of use categories, and the transitions between covers, particularly forest areas.

The research hypothesis is that the analytical method to assess intensity can identify areas vulnerable to change and reveal the dynamics of deforestation drivers. The results will provide valuable information for land-use planning, ecosystem restoration, and promoting sustainable agricul-

tural practices, and are essential for effective natural resource management in Mexico.

Materials and Methods. The study was carried out in three stages: land-use mapping acquisition and processing of land-use maps, analysis of the intensity of land-use changes (intensity, permanence, and transition), and landscape autocorrelation tests.

Mapping and Data. Six official INEGI land-use series (2001–2018) at 1:250,000 scale were used, and vegetation was classified into 20 categories according to the UNCCD. Each land-use cover was converted to 1 km × 1 km raster format, giving a total of 1 959 248 pixels; those that could not be mapped were excluded.

Intensity of Land-Use Change. The intensity analysis considers the extent and rate of change. Aldwaik and Pontius’s mathematical approach was used to compare observed intensities with a uniform mean intensity. Six time intervals were analyzed: 2001–2005, 2005–2009, 2009–2013, 2013–2016, 2016–2018, and 2001–2018, producing transition matrices that allow evaluating changes in land use. The analysis was performed in R and ArcGIS®.

Size and intensity of change. The size and intensity of annual change at each interval were calculated, determining whether the change was fast or slow.

Category permanence. The variation in gains and losses between categories was evaluated, and changes were classified as active or inactive according to their intensity.

Transition between categories: The transition between categories was analyzed to determine the size and intensity of changes between them, establishing whether a category tended to expand or contract.

Landscape Autocorrelation Analysis. Quantitative analysis and cartographic visualization were combined to investigate landscape evolution over 20 years, using the univariate local Moran’s I analysis to assess spatial autocorrelation. This information was used to construct a LISA map, which shows the concentration and differentiation of changes in the landscape at the local level.

Results and Discussion. Significant deforestation and landscape transformation patterns were identified, highlighting that approximately 40 % of the country’s surface area has experienced some type of land-use change.

The results show that deforestation has been particularly pronounced in areas with increased urban expansion and agricultural activities. A 10 % loss of forest cover was observed, while shrublands and grasslands remained relatively stable, although these also showed a 4 % reduction. The areas of high change intensity are located primarily in southern Mexico, where urban development is more intense, in contrast to the northern region, where there is a lower intensity of change.

The analysis also highlighted variability in land-use categories, with mainly “human settlements” showing significant increases. This suggests that socioeconomic dynamics and development policies have influenced landscape transformation.

Conclusions. In this study, applying the Aldwaik and Pontius methodology to assess the intensity of land use change has allowed a deep understanding of land-use and

vegetation cover dynamics in Mexico over six time intervals between 2001 and 2018. The loss of forest cover is significant, with a 10 % reduction, while other vegetation types have undergone minor changes.

The need for continuous and systematic monitoring of land-use mapping at the national level to identify trends in deforestation, urbanization, and changes in vegetation cover is emphasized. This is crucial for informed decision-

making in conservation policies and sustainable management of natural resources. In addition, it is suggested that future studies should consider verifying information in the field to improve the accuracy of analyses on the intensity of land-use change.

Keywords: land use, vegetation cover, land degradation, forest transformation.

INTRODUCCIÓN

Las transformaciones del paisaje y los ecosistemas son un importante desafío de investigación (Serra y Salvati, 2022). Por lo tanto, el estudio de los cambios en el uso y la cobertura del suelo es fundamental para abordar cuestiones ambientales críticas, como la desertificación, la eutrofización, la acidificación, el efecto invernadero, la pérdida de biodiversidad y el calentamiento global (Verburg *et al.*, 2015). Además, son fundamentales para la planificación del uso del suelo sostenible, ya que permiten identificar áreas críticas para la conservación de la biodiversidad, la protección de recursos hídricos y la reducción de conflictos entre usos de la tierra (Wang *et al.*, 2023).

La demanda de tierra para usos agrícolas y urbanos aumenta cada vez más (Chiu y Yeh, 2023). A nivel mundial, la pérdida de superficie forestal se relaciona con nuevos usos de la tierra, principalmente para agricultura y ganadería, y, en menor medida, por la expansión de las ciudades y la construcción de carreteras asociadas a actividades económicas variadas (CEPAL, 2021). Los cambios en el uso de la tierra y la cobertura (LUCC) es uno de los factores más importantes que junto con el cambio climático provocan la pérdida de biodiversidad a nivel mundial (IPCC, 2021).

En México, se han observado tasas anuales de pérdida de bosques que oscilan entre el 1% y el 8%, y esto varía según la región geográfica, el tipo de vegetación y el período analizado. La deforestación en el año 1997 ascendió a 668 000 hectáreas por año, en el año 2002 fue de 550 000 hectáreas por año y para 2007 fue de 534 707 hectáreas en el año (CONAFOR, 2020). La sustitución de bosques por áreas destinadas a la agricultura y el desarrollo urbano es motivo de inquietud, ya que ha tenido un impacto adverso en la vegetación natural del país (Maza-Villalobos *et al.*, 2023).

Diversidad de estudios se han concentrado en analizar las relaciones de cambios de uso de suelo en regiones de interés particular, como los Altos de Chiapas (Figueroa-Jáuregui *et al.*, 2011) o en subcuencas (Castelan Vega *et al.*, 2007). También se han ocupado a la relación entre cartografías de diferentes años (Velázquez *et al.*, 2002) o utilizando imágenes satelitales (Galindo Aguilar *et al.*, 2019), entre muchos otros, y en la mayoría de las situaciones analizando matrices y tasa de cambio. También están aquellos estudios que profundizan con algunas verificaciones en campo de la situación más actual (Evangelista Oliva *et al.*, 2010), así como técnicas más modernas como la aplicación de vehículos no tripulados (drones) (Velasco-Murguía *et al.*, 2021).

Es claro que la capacidad de manejo de grandes bases de datos es clave para el desarrollo de estudios a nivel detallado. Sin embargo, no se conocen estudios de cobertura nacional que muestren cómo ha sido la magnitud en los cambios de uso de suelo, particularizando en su intensidad, permanencia o transiciones. De acuerdo con Aldwaik y Pontius (2012), este tipo de análisis se refiere a la magnitud en el grado de cambio de uso que se produce en una determinada área o región a lo largo de un período de tiempo.

En este sentido, el objetivo de este estudio fue llevar a cabo un análisis de intensidad en el cambio de uso de suelo desde una perspectiva espacial observando tres elementos: la intensidad en los intervalos de tiempo (si la tasa de cambio entre años fue rápida o lenta); la permanencia entre categorías de uso (activas o inactivas) así como la transición entre coberturas, con énfasis en los usos forestales hacia otras coberturas. Se consideró el método de análisis de intensidad de los cambios de uso del suelo (Aldwaik y Pontius, 2012, 2013) y se destaca la transformación de las áreas forestales

a otros usos de la tierra en México, explorando cómo el crecimiento urbano y agrícola incide en este proceso.

La hipótesis planteada es que la aplicación del método de análisis de intensidad permite identificar áreas de mayor vulnerabilidad al cambio y entender las dinámicas subyacentes que impulsan la deforestación. Esta investigación proporciona información de la cobertura nacional, que podrá ser usada para la toma de decisiones informadas en políticas de planificación territorial, restauración de ecosistemas y promoción de prácticas agrícolas sostenibles. La comprensión de la intensidad del cambio de uso forestal en México es crucial para desarrollar estrategias efectivas de conservación y manejo sostenible de los recursos naturales.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó considerando tres etapas: obtención y procesamiento de cartografía de usos de suelo; aplicación del concepto de intensidad de los cambios de uso de suelo (intensidad, permanencia y transición) y, finalmente, uso de la prueba estadística de autocorrelación del paisaje, descrita a continuación.

Cartografía y datos

Se utilizaron las series de uso de suelo oficiales del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI); a saber: serie II (2001), serie III (2005), serie IV (2009), serie V (2013), serie VI (2016) y serie VII (2018); todas a escala 1:250 000. Los tipos de vegetación y uso de suelo de todas las cartografías se clasificaron en 20 categorías de acuerdo con la Convención de Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (CNULD) y el último informe de país a dicha convención (CONAZA-UACH, 2023) como se muestran en el Cuadro 1. Esta clasificación proporciona una base sólida para la comprensión y gestión del paisaje, permitiendo una identificación más precisa de áreas críticas y facilitando la implementación de medidas para la conservación y restauración de la tierra. Cada cobertura se convirtió al formato ráster con un tamaño de píxel de 1 km por 1 km,

lo que permite un equilibrio adecuado entre la resolución espacial y el manejo eficiente de los datos en un estudio de gran escala, como el que se realiza a nivel nacional, conservando además el uso de suelo dominante en esa superficie. De este modo, cada mapa ráster contiene 1 959 248 píxeles. Cabe resaltar que se excluyeron 19 944 píxeles que corresponden a superficie litoral y territorio insular no cartografiable.

Intensidad en el cambio de uso de suelo

El enfoque de intensidad considera tanto la extensión del cambio (espacio) como la rapidez con la que ocurre (tiempo). Se basa en el análisis de datos geoespaciales y la comparación de patrones temporales y espaciales en el cambio de cobertura o categorías (Figura 1). Por ello, este tipo de estudio con enfoque de paisaje permite una evaluación precisa de los cambios en el uso de la tierra en un contexto dinámico. El método de Aldwaik y Pontius (2012, 2013) es un marco matemático que compara una intensidad media uniforme con las intensidades observadas de cambios temporales entre categorías. La intensidad media uniforme se define como la intensidad de cambio hipotética cuando el cambio general ocurrido durante un intervalo de tiempo se distribuyó uniformemente, desde el principio hasta el final del intervalo.

Los cálculos se realizaron utilizando matrices de transición entre categorías de coberturas de uso de suelo y vegetación, valorando en concreto: (i) intervalos de tiempo, (ii) categorías o clases y (iii) tipos de transiciones. Se analizaron un total seis intervalos de tiempo entre las diferentes series de uso de suelo y vegetación: 2001-2005, 2005-2009, 2009-2013, 2013-2016, 2016-2018 y 2001-2018, dando como resultado seis matrices de transición (Anexo 1). Por último, se realizó un análisis de autocorrelación del paisaje para conocer la distribución espacial de los cambios en el paisaje que sirva como herramienta en la planificación, gestión y toma de decisiones en áreas como la conservación, el desarrollo sostenible y la evaluación de impacto ambiental. Todo el análisis de intensidad se realizó en entorno R (Exavier y Zeilhofer, 2020) para cada píxel antes definido, así como la cartografía en el entorno ArcGIS® software por Esri.

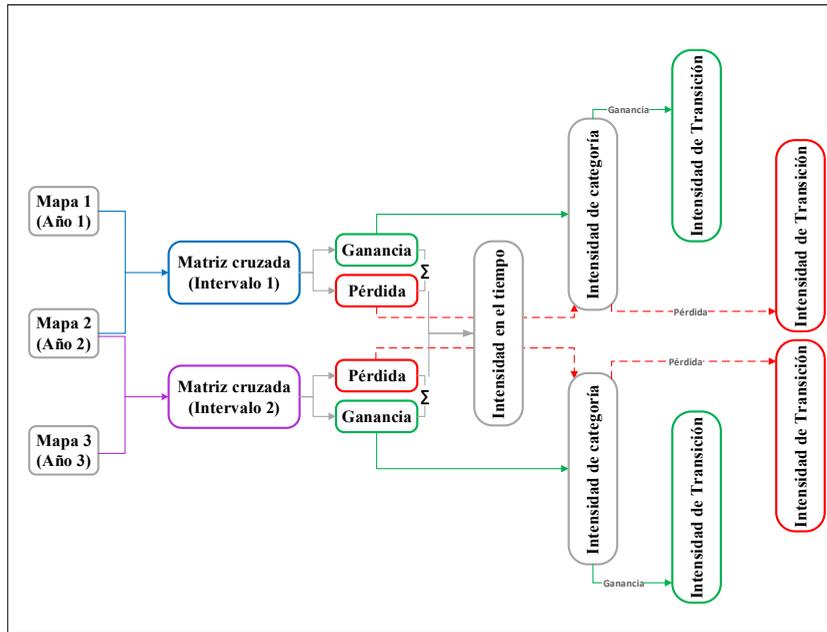


Figura 1. Diagrama del análisis de intensidad de la dinámica de cambio a nivel creciente de detalle: intervalo, categoría y transición. Fuente: adaptada de Aldwaik y Pontius (2012).

Tamaño e intensidad del cambio

El nivel de intervalo analizó el tamaño del cambio general y la intensidad del cambio anual de toda el área de estudio en cada intervalo de tiempo (Figura 1). La intensidad del cambio anual durante el intervalo de tiempo t (S_t) se calculó a través de la ecuación (1). La ecuación (2) muestra cómo se calculó la intensidad de cambio uniforme durante el intervalo de tiempo t (U). Cabe recalcar que se obtuvieron dos intensidades de cambio: rápido o lento, para los intervalos de tiempo estudiados. Si $S_t < U$ el cambio es lento, pero en el caso de $S_t > U$ entonces el cambio fue rápido.

$$S_t = \frac{\text{Superficie de cambio durante el intervalo } t}{\text{Superficie total} * \text{Duración del intervalo } t} * 100 \quad (1)$$

$$U = \frac{\text{Superficie de cambio durante todos los intervalos}}{\text{Superficie total} * \text{Duración de todos los intervalos}} * 100 \quad (2)$$

Permanencia de categorías

El nivel de categoría se ocupa de la variación en el tamaño y la intensidad de las ganancias y las pérdidas brutas entre categorías durante cada período de tiempo. La intensidad de ganancia (G_{tj}) a una categoría j corresponde al porcentaje del

tamaño final de esa categoría j que ganó durante el intervalo de tiempo t (Ecuación 3). La intensidad de la pérdida (L_{ti}) de una categoría i es el porcentaje perdido del tamaño inicial de esa categoría i durante el intervalo de tiempo t (Ecuación 4). La intensidad de un cambio uniforme durante el intervalo de tiempo t se define por S_t (Ecuación 1). Si $L_{ti} < S_t$ o $G_{tj} < S_t$, entonces la pérdida de la categoría i o ganancia de la categoría j durante el intervalo de tiempo t está latente. Si $L_{ti} > S_t$ o $G_{tj} > S_t$, entonces la pérdida de la categoría i o ganancia de la categoría j durante el intervalo de tiempo t está activa.

$$G_{tj} = \frac{\text{Ganancia bruta de la categoría } j \text{ durante el intervalo } t}{\text{Duración del intervalo } t * \text{superficie de la categoría } j} * 100 \quad (3)$$

$$L_{ti} = \frac{\text{Pérdida bruta de la categoría } i \text{ durante el intervalo } t}{\text{Duración del intervalo } t * \text{superficie de la categoría } i} * 100 \quad (4)$$

En este caso se obtuvieron dos intensidades de cambio: activo o inactivo, aplicable tanto a ganancias como a pérdidas de categorías en los intervalos de tiempo estudiados (Figura 1).

Transición entre categorías

El nivel de transición se calculó para cada categoría analizando el tamaño y la intensidad de las transiciones de una categoría dada entre las otras categorías disponibles para la transición (Figura 1). La intensidad de transición de la categoría i a la categoría j durante el intervalo de tiempo t (R_{tin}), donde i es diferente de n se define por la Ecuación 5, mientras que la transición de la categoría j a la categoría m durante el intervalo de tiempo t (Q_{tmj}), donde j es diferente de m se definió por la ecuación 7. Las ecuaciones 6 y 8 presentan la intensidad de transición uniforme o hipotética a la categoría n durante el intervalo de tiempo t (W_{tn}) y categoría m durante el intervalo de tiempo t (V_{tmj}), respectivamente. Si $R_{tin} > W_{tn}$, el tipo de cobertura terrestre n tiende a expandirse a través de la conversión del tipo de cobertura terrestre i , y viceversa. Si $Q_{tmj} > V_{tmj}$, el tipo de cobertura terrestre m tiende a convertirse en el tipo de cobertura terrestre j y viceversa.

$$R_{tin} = \frac{\text{Transición de la categoría } i \text{ a } n \text{ durante el intervalo } t}{\text{Duración del intervalo } t * \text{superficie de la categoría } i} * 100 \quad (5)$$

$$W_{tn} = \frac{\text{Ganancia de la categoría } n \text{ durante el intervalo } t}{\text{Duración del intervalo } t * \text{superficie que no es la categoría } n} * 100 \quad (6)$$

$$Q_{tmj} = \frac{\text{Transición de la categoría } m \text{ a } j \text{ durante el intervalo } t}{\text{Duración del intervalo } t * \text{superficie de la categoría } j} * 100 \quad (7)$$

$$V_{tmj} = \frac{\text{Pérdida de la categoría } m \text{ durante el intervalo } t}{\text{Duración del intervalo } t * \text{superficie que no es la categoría } m} * 100 \quad (8)$$

Se obtuvieron dos intensidades de cambio: transición, para ganancias y pérdidas entre cada categoría de los intervalos de tiempo estudiados (Figura 1).

Análisis de autocorrelación del paisaje

Para representar la evolución del paisaje durante el periodo de 20 años se empleó un enfoque que combina el análisis cuantitativo y la visualización cartográfica. Para lo anterior, se contabilizó el número de cambios observados en cada píxel y su relación con los píxeles circundantes. Con ello se corroboró el comportamiento espacial de un

pixel con sus vecinos. Lo anterior proporciona una comprensión más profunda de la estructura espacial del paisaje. Se aplicó el análisis de Moran local univariado (Zhao *et al.*, 2022), que consiste en evaluar la autocorrelación espacial de una o más variables en el paisaje. El resultado de esta prueba es un mapa de asociación espacial local, comúnmente conocido como LISA (Indicadores Locales de Asociación Espacial, por sus siglas en inglés). Este mapa se basa en la prueba Z y revela directamente las características de agregación y diferenciación de la variable en el contexto local o a nivel de píxel. Esto significa que, además de identificar áreas con alta concentración de cambios o similitudes, el análisis LISA también resalta las áreas con diferenciación significativa de los patrones del paisaje, lo que brinda una comprensión más profunda de la dinámica espacial (Anselin, 2011).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Intensidad de cambio en el tiempo

Se analizaron cinco intervalos de tiempo: 2001-2005, 2005-2009, 2009-2013, 2013-2016 y 2016-2018, para 20 categorías de cobertura de suelo, según la clasificación de la CNUCLD (2023). Durante estos períodos se observaron variaciones importantes de pérdidas y ganancias de cobertura (Cuadro 1). La categoría que mostró un aumento significativo (ganancias) en su extensión fue la de asentamientos humanos, con un incremento de hasta el 116%. Esta tendencia se corrobora con los censos de población y vivienda, que indican que en el año 2000 la población en México era de 97 483 412 habitantes, y para 2020 ascendió a 126 014 024 (INEGI, 2020). Otras categorías que experimentaron ganancias, aunque en menor intensidad, incluyen las zonas deforestadas de bosques (vegetación secundaria de bosques), que aumentaron hasta un 56%, y la vegetación baja inundable, que creció un 53%. En contraste, algunas categorías, como los bosques latifoliados, otras superficies arboladas y la vegetación secundaria de selvas, vieron una disminución (pérdidas) de entre el 15% y el 20% de su superficie. Por otro lado, los bosques de coníferas, los bosques mixtos de coníferas y latifoliadas, las selvas bajas y

Cuadro 1. Clasificación y superficies (km²) de coberturas de uso de suelo y vegetación en México en diferentes años.

| Categorías | Clave | Serie II | Serie III | Serie IV | Serie V | Serie VI | Serie VII | Cambio neto (%) 2001-2018 |
|---------------------------------------|-------|----------|-----------|----------|---------|----------|-----------|------------------------------|
| | | 2001 | 2005 | 2009 | 2013 | 2016 | 2018 | |
| Coníferas | CO | 65 429 | 62 395 | 62 816 | 62 516 | 60 938 | 60 382 | -7.71 |
| Coníferas y latifoliadas | CL | 111 866 | 104 373 | 101 268 | 101 606 | 101 686 | 102 143 | -8.69 |
| Latifoliadas | LA | 92 075 | 74 991 | 73 181 | 72 912 | 72 978 | 73 227 | -20.47 |
| Bosque mesófilo | BM | 13 348 | 12 652 | 13 007 | 13 239 | 13 006 | 12 923 | -3.18 |
| Selvas altas y medianas | SAM | 96 907 | 108 557 | 110 404 | 116 284 | 105 879 | 107 580 | 11.01 |
| Selvas bajas | SB | 101 879 | 99 345 | 97 646 | 97 117 | 96 261 | 96 654 | -5.13 |
| Otras superficies arboladas | OSA | 27 959 | 26 293 | 25 545 | 25 669 | 23 343 | 22 684 | -18.87 |
| Vegetación secundaria de bosques | VSB | 64 352 | 89 122 | 93 514 | 92 884 | 95 948 | 100 866 | 56.74 |
| Vegetación secundaria de selvas | VSS | 116 000 | 107 767 | 99 666 | 90 444 | 98 819 | 98 399 | -15.17 |
| Total de superficies arboladas | | 689 815 | 685 495 | 677 047 | 672 671 | 668 858 | 674 858 | -2.17 |
| Pastizales | PA | 296 149 | 313 926 | 309 395 | 309 080 | 306 816 | 297 312 | 0.39 |
| Matorral de zonas áridas | MZA | 345 843 | 341 455 | 339 248 | 338 354 | 337 812 | 334 709 | -3.22 |
| Matorral de zonas semiáridas | MZS | 209 664 | 182 815 | 180 809 | 178 026 | 178 244 | 178 525 | -14.85 |
| Total de pastizales y matorrales | | 851 656 | 838 196 | 829 452 | 825 460 | 822 872 | 810 546 | -4.83 |
| Vegetación costera | VC | 32 892 | 31 250 | 26 695 | 27 583 | 27 243 | 26 941 | -18.09 |
| Manglar | MA | 9175 | 9283 | 9438 | 9881 | 9079 | 9126 | -0.53 |
| Vegetación baja inundable | VBI | 10 746 | 10 573 | 23 363 | 23 592 | 15 785 | 16 505 | 53.59 |
| Total de vegetación costera y manglar | | 52 813 | 51 106 | 59 496 | 61 056 | 52 107 | 52 572 | -0.46 |
| Agricultura de temporal | AT | 202 911 | 213 938 | 222 034 | 224 276 | 226 835 | 223 760 | 10.27 |
| Agricultura de riego | AR | 88 122 | 100 920 | 100 920 | 103 637 | 102 711 | 108 813 | 23.48 |
| Total de agriculturas | | 291 033 | 314 858 | 322 954 | 327 913 | 329 546 | 332 573 | 14.27 |
| Asentamientos humanos | AH | 11 081 | 12 444 | 15 823 | 18 406 | 21 676 | 23 981 | 116.42 |
| Sin vegetación aparente | SVA | 31 193 | 30 983 | 21 710 | 21 900 | 31 468 | 31 625 | 1.38 |
| Cuerpos de agua | CA | 13 021 | 13 033 | 13 772 | 12 881 | 12 466 | 12 838 | -1.41 |

Fuente: Elaboración propia a partir de INEGI Carta de Uso del Suelo y Vegetación (Serie II III IV V VI y VII).

los bosques mesófilos perdieron menos del 10% de su superficie, aunque también mostraron cambios significativos en términos de pérdidas y ganancias a lo largo de todo el periodo de evaluación

En el periodo evaluado se han mantenido 321 027 km², 211 167 km² y 167 656 km² de matorral de zonas áridas, pastizales y matorral de zonas semiáridas, respectivamente. Hay que recordar

que la vegetación de zonas áridas y semiáridas del centro y norte de México son recursos naturales que comprenden alrededor del 25% de la superficie nacional y tienen la capacidad de proporcionar varios productos y servicios ambientales a la sociedad (Jurado-Guerra *et al.*, 2021).

Un análisis gráfico de cada intervalo se resume en las Figura 2 y Figura 3, donde se observa que la deforestación de bosques de coníferas, coníferas y latifoliadas, bosque mesófilo y bosques de latifoliadas ha experimentado incrementos desde el año 2001. Sin embargo, Sánchez Colón *et al.*

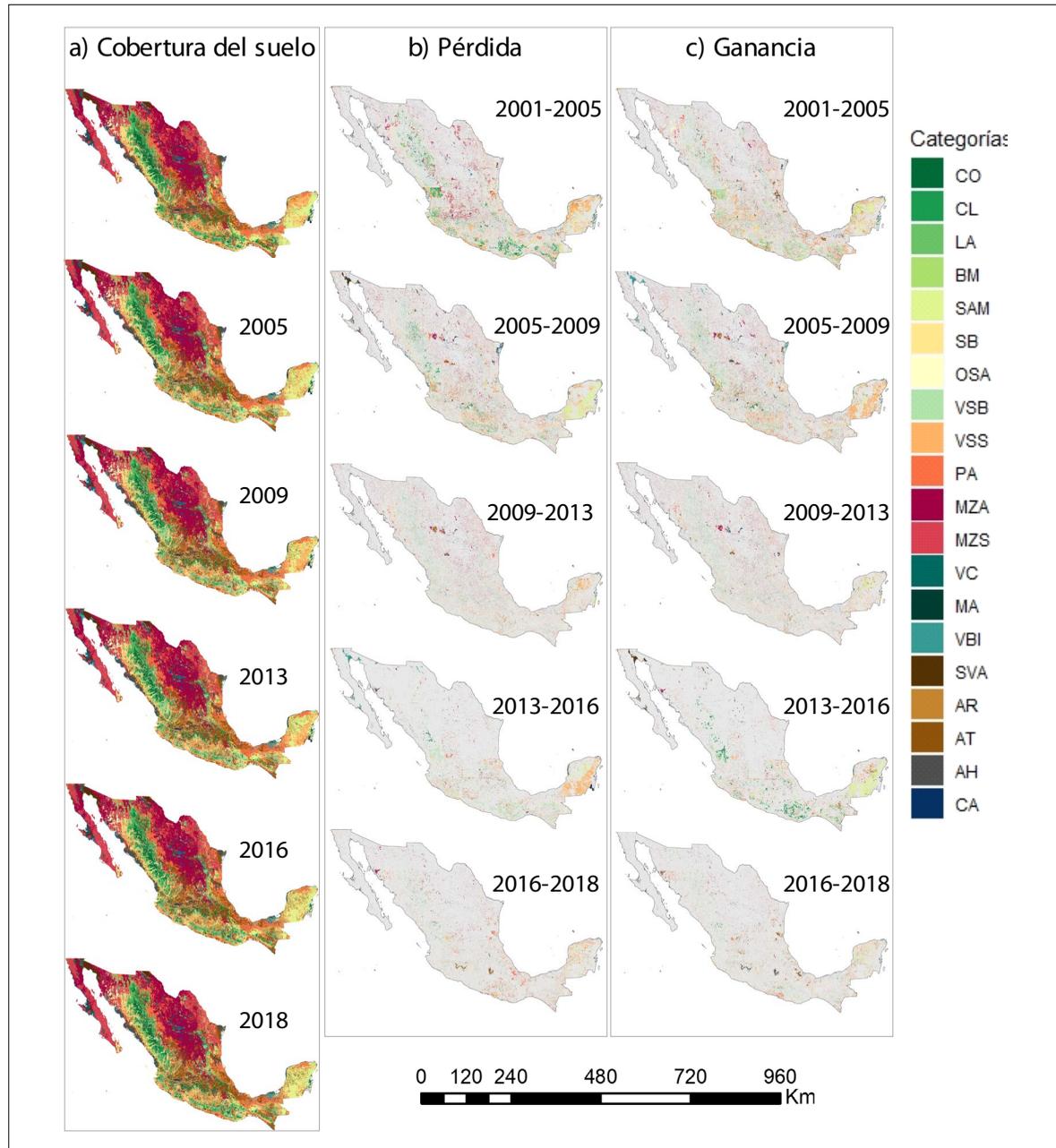


Figura 2. Mapas de a) categorías de cobertura y usos del suelo, b) pérdidas y c) ganancias en las coberturas dominantes utilizadas para México.

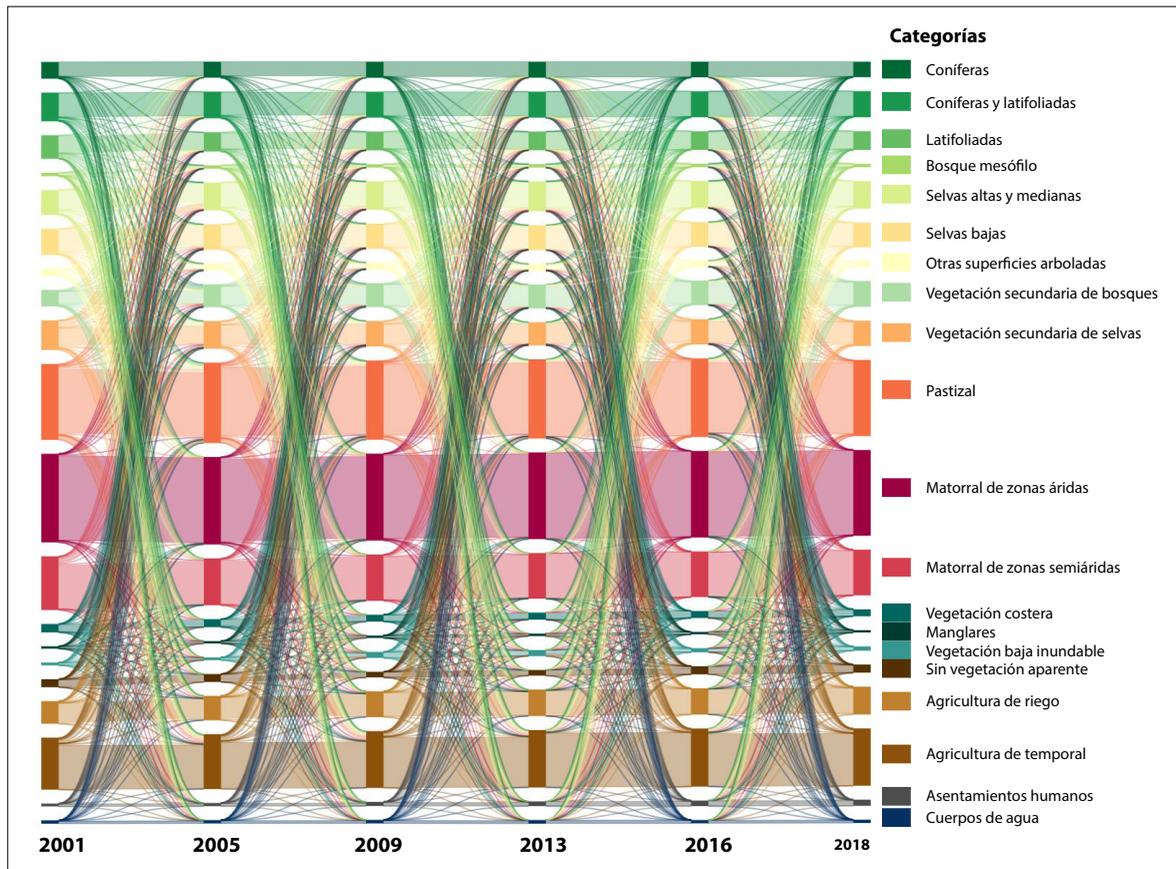


Figura 3. Características del cambio de uso de suelo en México en el diagrama de Sankey (2001- 2018).

(2009) aseguran que en el periodo de 1970-2002 se dio una pérdida total de 22 972 km² de selvas húmedas, 10 622 km² de selvas subhúmedas y 9000 km² de bosques.

Las 20 categorías de uso de suelo y vegetación en México han mostrado un relativo balance entre ganancias y pérdidas (Figura 4) en los cinco periodos evaluados. No es de extrañar que las categorías que han presentado cambios netos más notorios sean aquellas relacionadas con procesos de recuperación y actividades agropecuarias, como la agricultura de riego, vegetación secundaria de selvas, pastizales y agricultura de temporal. Es importante señalar que, en este estudio, la vegetación secundaria se compone principalmente de las primeras fases de la sucesión, como la herbácea y arbustiva, las cuales, según INEGI (2017), se consideran las más degradadas o perturbadas.

A pesar de que estas áreas podrían parecer en proceso de recuperación, muchas continúan siendo afectadas por la deforestación o alteraciones, lo que impide una regeneración completa. Un ejemplo es la categoría de vegetación secundaria de bosques, que ha registrado una ganancia neta de 36 512 km², pero refleja un continuo proceso de perturbación, dado que siguen creciendo las superficies afectadas por actividades humanas. Además, se observa un crecimiento en superficies vinculadas a actividades antropogénicas de producción y desarrollo, como la agricultura de temporal (20 825 km²), la agricultura de riego (20 684 km²) y los asentamientos humanos (12 896 km²), así como en selvas altas y medianas (10 672 km²). Lo anterior concuerda con lo reportado por Monjardín-Armenta *et al.* (2017) para Sinaloa, donde la deforestación se debe principalmente a la expansión agrícola en el estado

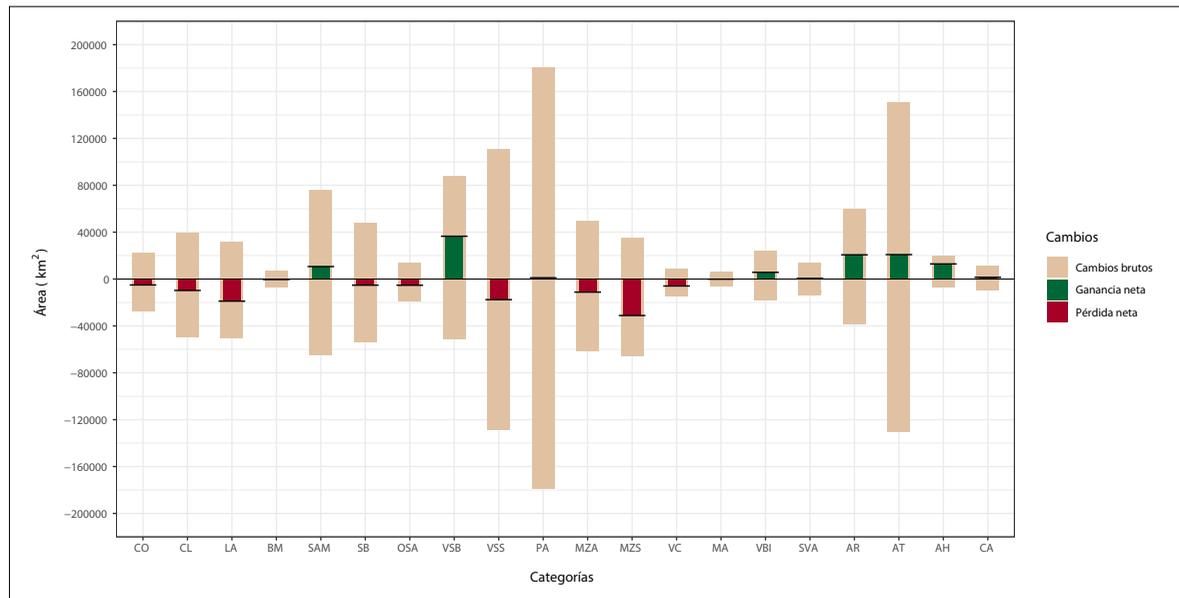


Figura 4. Variaciones netas y brutas en México del 2001 a 2018.

del orden de 49.40%, siendo además influenciada por 33% de factores demográficos, 29% de factores económicos, y 12% de factores tecnológicos debido al incremento acelerado de la población.

Si bien la conservación de las selvas ha sido un reto nacional, Rosete-Vergés *et al.* (2014) menciona que durante el periodo de 2000 a 2007, a nivel nacional se observa una desaceleración en la velocidad de la pérdida de selvas e incluso tasas positivas. Este hallazgo concuerda con el estudio de López-Jiménez *et al.* (2019), realizado en selva mediana subperennifolia de Yucatán, que sugiere que las selvas se están recuperando lentamente en términos de estructura, como la altura del dosel, el área basal y la cobertura, en comparación con la recuperación de la diversidad biológica. Esta evidencia resalta la importancia de implementar estrategias de manejo y conservación que no solo promuevan la recuperación de la biodiversidad, sino también la restauración efectiva de la estructura y función de los ecosistemas selváticos degradados.

El cambio total en los intervalos 2001-2005 y 2005-2009 fue arriba de 13% de la superficie total del país (254 702.24 km²) (Figura 5, barras a la izquierda), es decir, para ambos periodos fue un

cambio rápido ($S_t > U$) (Figura 5, barras a la derecha). En los intervalos 2009-2013 y 2013-2016 los cambios anuales son lentos ($S_t < U$), después de estos periodos, (periodo 2016-2018), el cambio también es nuevamente rápido ($S_t > U$) a diferencia del periodo previo a este la tasa de cambio del intervalo es menor pero la tasa de cambio anual lo supera en 3%. Farfán Gutiérrez *et al.* (2016) y Pérez-Vega *et al.* (2020) reportan datos similares para los mismos periodos de tiempo en la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán (2000-2004) y el estado de Guanajuato (2002-2007), respectivamente. Vale la pena destacar que estos resultados pueden estar relacionados con el volumen de la producción forestal maderable según el censo de la Encuesta Nacional Agropecuaria del INEGI (2017), que indicó que, en los años 2000 y 2016, se registraron 7 743 604 y 6 879 078 m³ en rollo, respectivamente. Ya que el manejo forestal inadecuado puede interactuar para provocar impactos negativos en los ecosistemas forestales, tales como la degradación de áreas naturales, cambios en la composición de especies, fragmentación del hábitat y disminución de la productividad forestal, como lo mencionan Monárrez-González *et al.* (2018).

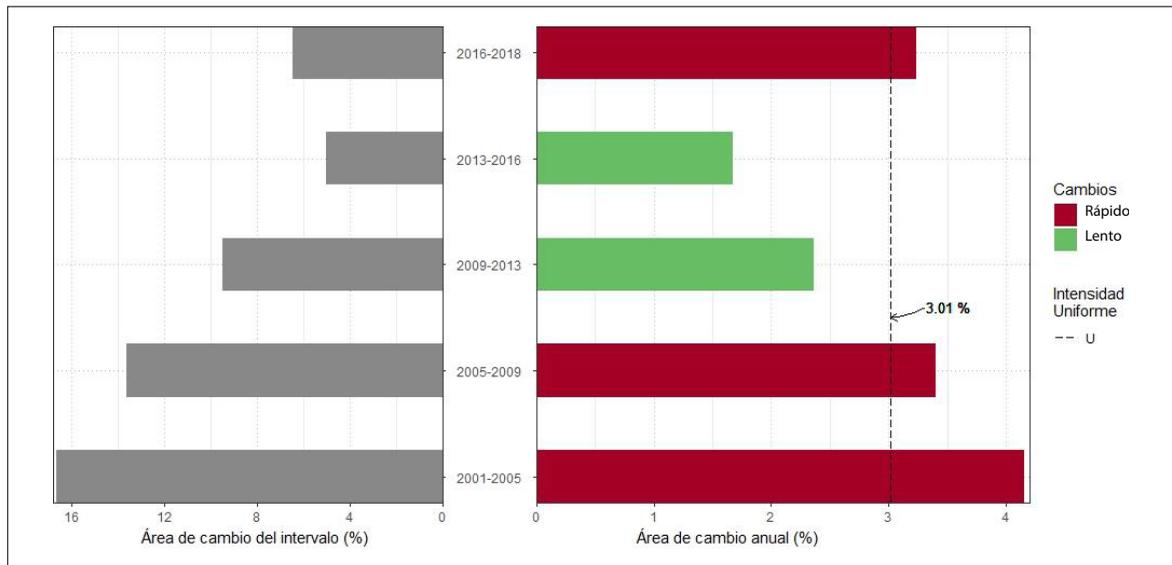


Figura 5. Cambios a nivel de intervalo del LUCC para los intervalos de tiempo. Nota: las barras del lado izquierdo representan LUCC durante el intervalo de tiempo y las barras del lado derecho muestran las tasas anuales.

Rosete-Vergés *et al.* (2014) mencionan que la superficie forestal disminuye anualmente en alrededor de 500 000 ha en el periodo de 2000 al 2007. Mientras que, de acuerdo con CONAFOR (2020), el valor mínimo de deforestación ocurrió en el año 2001 (79 672 ha) y el máximo en 2016 (350 298 ha). El comportamiento de la deforestación bruta muestra una tendencia general creciente desde 2001 hasta 2016, con el máximo en el último año del periodo.

Sin embargo, estas variaciones pueden deberse a otros factores como cambios en la actividad económica del país; tal es el caso ocurrido en el año 2009, donde el crecimiento económico de México se contrajo un 6.7% (CEPAL, 2009), mientras que para el año 2010 la tasa de crecimiento del PIB de México en 2010 fue de 5.1%, (Espinal Erquizio y Ramírez Rodríguez, 2014). Factores como el crecimiento de la población y la urbanización pueden ejercer presión sobre la tierra, resultando en cambios en el uso del suelo para satisfacer las necesidades de vivienda, infraestructura y servicios, de acuerdo con SEMARNAT (2019) en el *Informe de la situación del medio ambiente en México* el crecimiento poblacional en México durante el año 2014 alcanzó los 58.3%, valor superior al promedio mundial. Por

otro lado, procesos migratorios como lo mencionan Sánchez y Acosta (2018) durante el periodo de 2005 al 2010, el número de los mexicanos y sus hijos que se movieron de Estados Unidos a México llegó a 1.4 millones, casi doblando el número de los que habían regresado en el periodo entre 1995 y 2000. Mientras que, de acuerdo con González Higuera *et al.* (2019) para el periodo de 2005-2010 ingresaban a México 1 827 728 y para el periodo de 2010-2015 ingresaron a 1 502 497 entre deportados mexicano e inmigrantes de otros países.

En resumen, este estudio confirma que existe deforestación significativa y con cambios importantes desde el año 2001, particularmente de bosques de coníferas, coníferas con latifoliadas, latifoliadas, bosque mesófilo de montaña y selvas bajas.

Permanencia en categorías de uso de tierra

El análisis a nivel de categoría permite analizar a detalle qué categorías son relativamente inactivas o activas en un determinado intervalo de tiempo y si este patrón es estable a lo largo de los intervalos de tiempo (Aldwaik y Pontius, 2012). Las gráficas de nivel de categoría muestran el tamaño y la intensidad anual del cambio de ganancias y pérdidas, Figura 6a y 6b respectivamente, de cada categoría

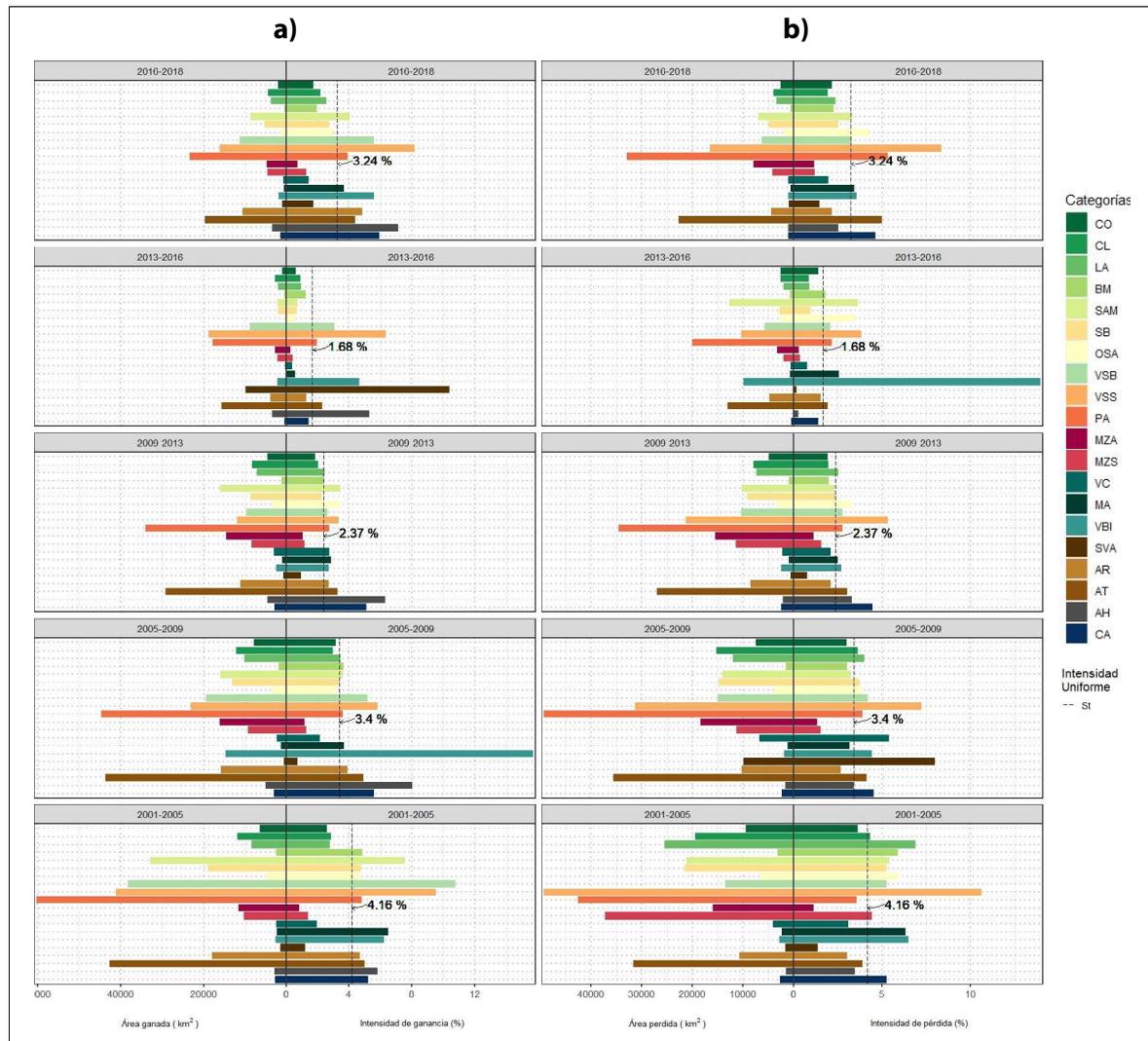


Figura 6. Ganancias y pérdidas a nivel de categoría de LUCC para los intervalos de tiempo. Nota: las barras que se extienden a la izquierda del cero muestran el área bruta anual de ganancias, mientras que las que se extienden a la derecha del cero muestran la intensidad de las ganancias y pérdidas anuales dentro de cada categoría.

con relación al tamaño de la categoría en el punto de tiempo final del intervalo.

De este análisis se observa que las superficies perturbadas (vegetación secundaria de bosques y vegetación secundaria de selvas) se mantienen estacionariamente activa tanto en ganancia ($G_{tj} > S_t$) como en pérdida ($L_{ti} < S_t$). Lo anterior sugiere que en los cinco intervalos de tiempo estudiados la deforestación se mantuvo activa (al ubicarse a la derecha de la intensidad uniforme o línea punteada),

incrementando hasta 58 790.50 km² y al mismo tiempo presentando pérdidas de hasta 51 983.17 km². Estos procesos de recuperación de la vegetación sugieren que, en lugar de originarse en áreas inicialmente desprovistas de vegetación, agrícolas o ganaderas, son consecuencia de la alteración de la vegetación primaria o de bosques secundarios. Por lo tanto, están más relacionados con procesos de degradación de la vegetación forestal que con su recuperación (Rosete-Vergés *et al.*, 2014).

Mientras que, las superficies cubiertas por coníferas se mantienen estacionariamente inactivos tanto en ganancias ($G_{tj} < S_t$) como en pérdidas ($L_{ti} < S_t$), coníferas con latifoliadas únicamente en ganancias ($G_{tj} < S_t$).

El análisis por categoría refleja que para el periodo del 2001-2005, las superficies forestales presentaron tendencia a pérdida de superficie o deforestación, a excepción de coníferas; mientras que para los intervalos 2005-2009 y 2009-2013, latifoliadas se mantuvieron activas en términos de pérdidas ($L_{ti} < S_t$). Las selvas bajas presentaron pérdidas activas en los tres primeros periodos, el resto fueron inactivas, caso contrario ocurre con las selvas altas y medianas, donde en los periodos 2013-2016 y 2016-2018 pasan a ser activas en pérdidas. Rosete-Vergés *et al.* (2014) para el periodo 1976-2007 la superficie anual deforestada alcanzó 534 707 ha, con una tasa anual de -0,08% para bosques y para selvas de -0,41%, mientras que desde el año 2000 los bosques se han recuperado en 0.6% y las selvas en 0.01%.

Los bosques mesófilos de montaña son el tipo de vegetación más diverso en México con relación a la superficie que ocupan y se ha estudiado por más de 20 años (Williams-Linera, 2015), desafortunadamente esto no ha ayudado en su conservación, ya que el análisis por categoría reflejó deforestación activa ($L_{ti} < S_t$) durante los periodos 2001-2005 y 2013-2016.

El crecimiento de los asentamientos humanos es un componente central de los cambios de cobertura y uso de la tierra que amenazan gravemente la conservación de la biodiversidad y los ecosistemas (Concepción Cuevas, 2022). Mismo que en el país se mantiene a lo largo de los 17 años, donde la intensidad de cambio es activa ($G_{tj} > S_t$) para los intervalos 2005-2009, 2009-2013 y 2013-2016, el resto de los periodos permanece inactivo.

En resumen, la deforestación se mantiene consistentemente activa en términos de ganancias en todos los intervalos de tiempo estudiados, incrementando su superficie bruta hasta 108 088.00 km².

Análisis a nivel de transición

Se analizaron un total de 3800 transiciones para los cinco intervalos analizados. De los anteriores

se hace énfasis en las áreas forestales hacia otras categorías (pérdida de cobertura forestal) y que presentaron una tendencia activa en el análisis por categoría para ganancias y pérdidas.

Es bien sabido que, a lo largo de los años, el crecimiento y desarrollo humano es uno de los principales responsables del cambio del uso del suelo agrícola a urbano y de la deforestación (Soto-Cortés, 2016). Este análisis respalda esta afirmación, ya que se observó un aumento significativo, cercano al 116%, en la extensión de asentamientos humanos desde 2001 hasta 2018. La mayor parte de este crecimiento proviene de áreas dedicadas a la agricultura de riego y temporal ($>$), y esta transición se mantiene constante (Figura 7a).

El análisis de transición también revela otra preocupante tendencia, el crecimiento urbano está obstaculizando la recuperación de áreas forestales, mayormente en selvas (Rosete-Vergés *et al.*, 2014). Para el intervalo 2005-2009 (Figura 7a), donde los asentamientos humanos han reducido 0.06%, la superficie de selvas en proceso de recuperación.

Desafortunadamente y a pesar de los esfuerzos que se han realizado para la conservación de las áreas forestales del país (Flores *et al.*, 2021) las coberturas como latifoliadas, coníferas con latifoliadas, coníferas, selvas bajas y bosque mesófilo han disminuido, en los 17 años, 20%, 9%, 8%, 5% y 3% de su superficie, respectivamente (Figura 4). Lo anterior se refleja en la Figura 8a, donde se presente que las zonas degradadas de bosques (vegetación secundaria de bosques) han incrementado de manera estacionaria, ganando superficie a coníferas, coníferas y latifoliadas, latifoliadas y bosque mesófilo ($>$), mientras que en la Figura 8b las zonas degradadas de selvas (vegetación secundaria de selvas) ha incrementado ganando su superficie. Información que concuerda con SEMARNAT (2019), en el *Informe de la situación del medio ambiente en México*, donde se reportó que entre 1990 y 2000 se deforestaron 354 mil hectáreas anuales de bosques y 92 mil hectáreas anuales en el periodo 2010-2015.

Las actividades agropecuarias se consideran dentro de las principales actividades responsables de la deforestación, seguida de la tala clandestina y los incendios forestales intencionales (Flores *et al.*, 2021). Además, cabe resaltar que las áreas forestales

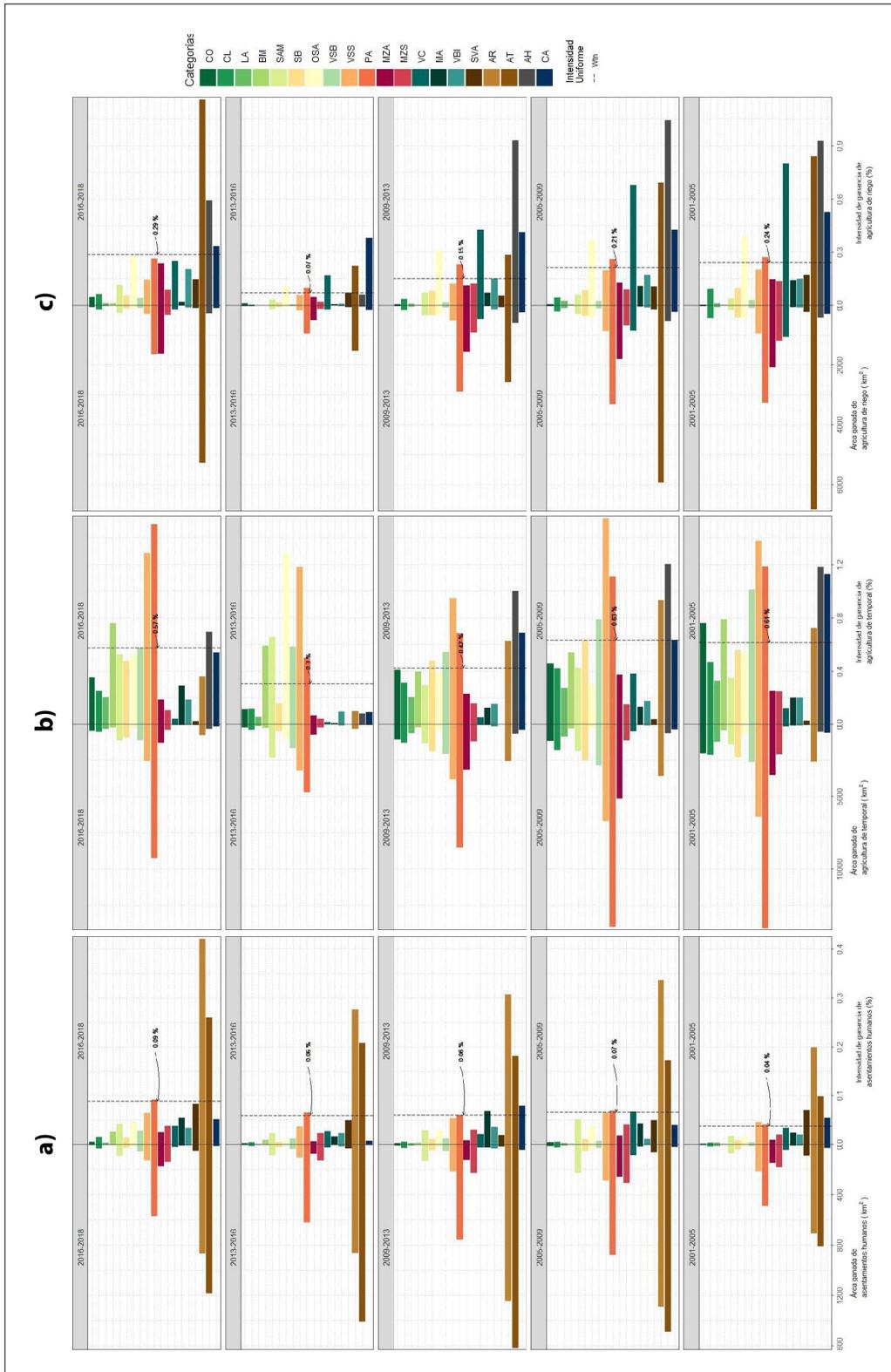


Figura 7. Análisis de intensidad de cambio anual por transición hacia a) asentamientos humanos, b) agricultura de riego y c) agricultura de temporal.

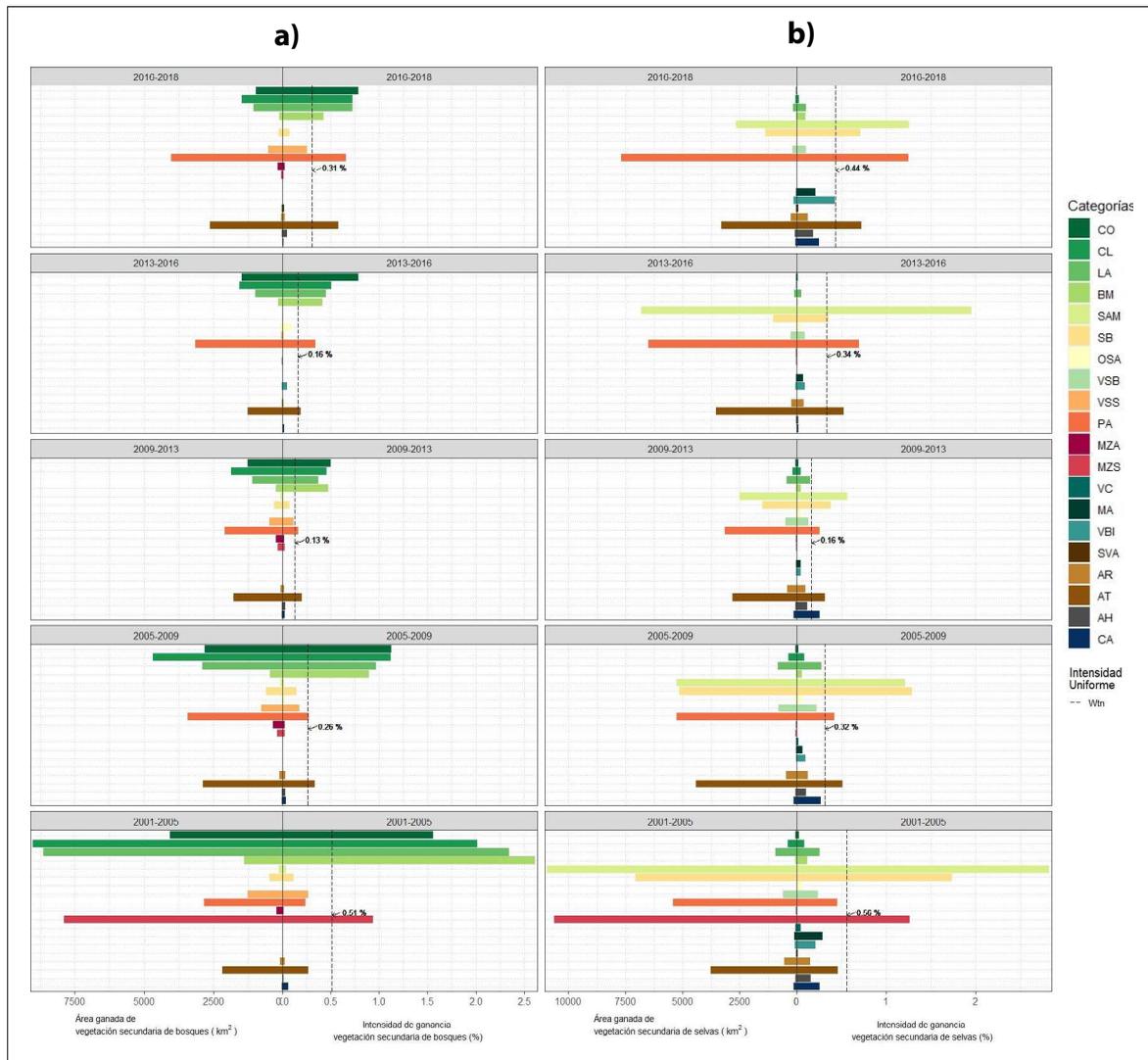


Figura 8. Análisis de intensidad de cambio anual por transición hacia a) vegetación secundaria de bosques y b) vegetación secundaria de selvas.

son de vital importancia, ya que proveen de manera simultánea, dinámica y compleja una gran diversidad de servicios ecosistémicos y contribuyen en la mitigación al cambio climático y (Galicia *et al.*, 2015; Monárrez-González *et al.*, 2018).

Las principales transiciones detectadas desde por coníferas, coníferas con latifoliadas, bosque mesófilo, latifoliadas, selvas altas y medianas y selvas bajas de manera estacionaria en términos de pérdida $Q_{tmj} > V_{tmj}$ se observa en las figuras 9 y 10. En otras palabras, muestran una tendencia a la

deforestación (todos los intervalos) y al aumento de la agricultura temporal (todos los intervalos), como se muestra en las figuras 9a y 10a donde principalmente se reduce la superficie ocupada por coníferas y bosque mesófilo ($Q_{tmj} > V_{tmj}$). Algo similar sucede con las latifoliadas cuando se destinan al incremento de pastizales donde $Q_{tmj} > V_{tmj}$ para los todos los intervalos. De acuerdo con el informe de CONAFOR (2020), la conversión de tierras forestales en pastizales es la más común en períodos similares a los analizados en este estudio,

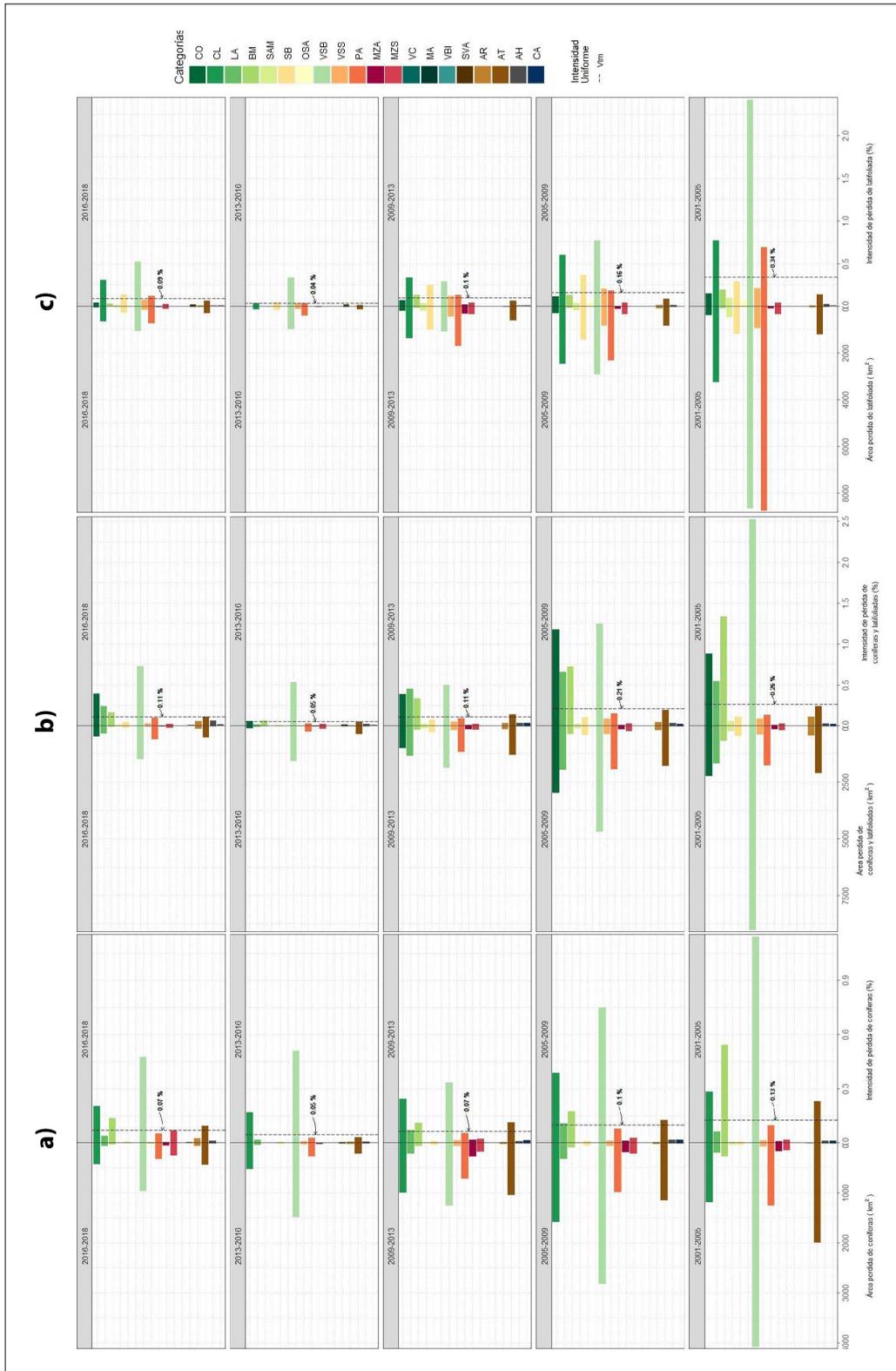


Figura 9. Análisis de intensidad de cambio anual por transición desde a) coníferas, b) coníferas con latifoliadas y c) latifoliadas.

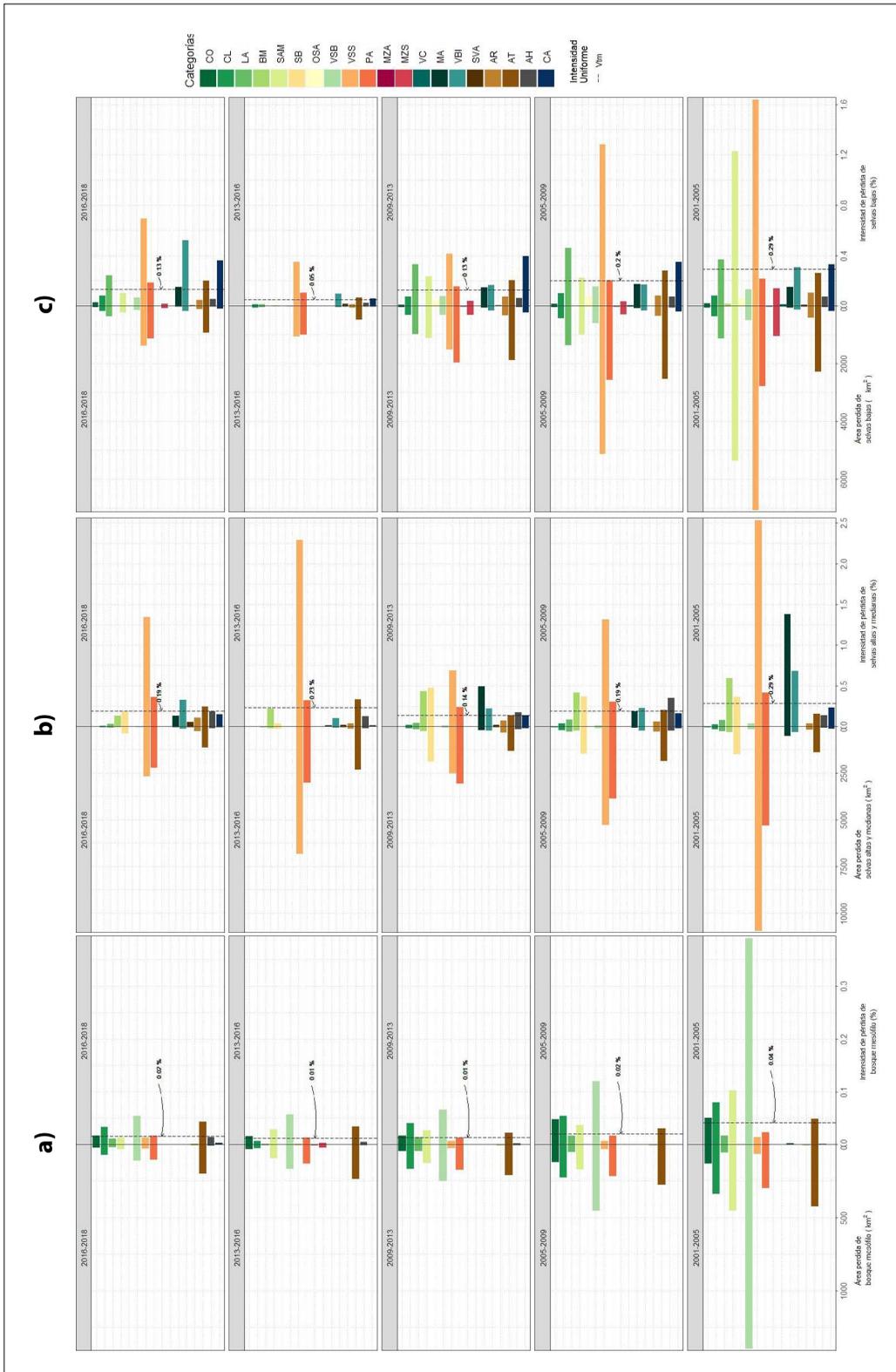


Figura 10. Análisis de intensidad de cambio anual por transición desde a) bosque mesófilo, b) selvas altas y medianas y c) selvas bajas.

alcanzando su punto máximo en 2014, mientras que la transformación de tierras forestales en tierras agrícolas muestra su mayor intensidad en 2016.

Un dato importante observado es la transición ocurrida en todos los intervalos entre coníferas, coníferas con latifoliadas y latifoliadas, con mayor tasa de cambio en los intervalos 2001-2005 y 2005-2009 (Figura 9 y 10). Esto puede deberse principalmente al aprovechamiento forestal, ya que los pinos mexicanos, junto con otras coníferas, son el principal soporte de la industria forestal debido a que de ellos se obtienen madera aserrada, resina, astilla, postes, acículas, conos, semillas (López y Flores, 2020). En Michoacán, el impacto de la producción de aguacate es particularmente evidente en la franja aguacatera. La expansión de las huertas de aguacate ha reducido considerablemente los bosques templados, dejando solo pequeños fragmentos de bosque, que oscilan entre diez y 20 hectáreas (Latorre-Cárdenas *et al.*, 2023).

La producción forestal para diversos fines en el año 2000 fue de 9 millones de metros cúbicos, disminuyendo aproximadamente en cuatro millones hasta el año 2014. Posteriormente, la producción aumentó a 5.8 millones de metros cúbicos en 2014 y llegó a 9 millones en 2018. Es importante destacar que, exclusivamente en los estados de Durango y Chihuahua, el pino (*Pinus* spp) representa el principal árbol aprovechado, abarcando el 90% y el 95% del volumen total de producción de madera, respectivamente (Manuel Barrera *et al.*, 2001).

Otros autores como Rivas-Rivas *et al.* (2017) se inclinan a que lo anterior puede ocurrir debido a la reforestación con especies como *Quercus* debido a su capacidad de adaptación, pueden ser útiles en proyectos de restauración forestal en diferentes condiciones de suelo y dosel. Mientras que Sáenz-Romero *et al.* (2016) sugieren que algunas especies cambiarán de gradiente altitudinal principalmente por el cambio climático.

Patrones de intensidad de cambio en el paisaje

Existe correlación espacial positiva baja y agregación espacial significativa del uso del suelo a nivel

nacional, lo anterior de acuerdo con el índice de Moran ($I=0.330$) (Figura 11), similar a lo reportado por Zhao *et al.* (2022) donde el índice de Moran para los años 1995 y 2018 fue de 0.304 y 0.188, respectivamente. Por lo anterior, se sugieren cuatro tipos de intensidad de cambio de uso del suelo de acuerdo con los tipos de asociación espacial: intensidad alta (agrupamiento I o alto-alto), intensidad media (o agrupamientos II y IV, alto-bajo y bajo-alto, respectivamente), intensidad baja (agrupamiento III o bajo-bajo) y no significativo. Este último quiere decir que el pixel bajo prueba es significativamente diferente de los pixeles circundantes (McGrath y Zhang, 2003).

A nivel nacional el 60% de la superficie no presentó cambios significativos en la cobertura o uso de suelo, 24% de cobertura del suelo presentó baja intensidad de cambio, dentro de este porcentaje, las coberturas arbóreas que conservaron entre 15% y 20% de su superficie siguen el siguiente orden de mayor a menor conservación coníferas > coníferas y latifoliadas > otras superficies arboladas > latifoliadas > selvas bajas > selvas altas y medianas; mientras que en 11% del territorio nacional la intensidad de cambio fue alta, las coberturas arbóreas que se

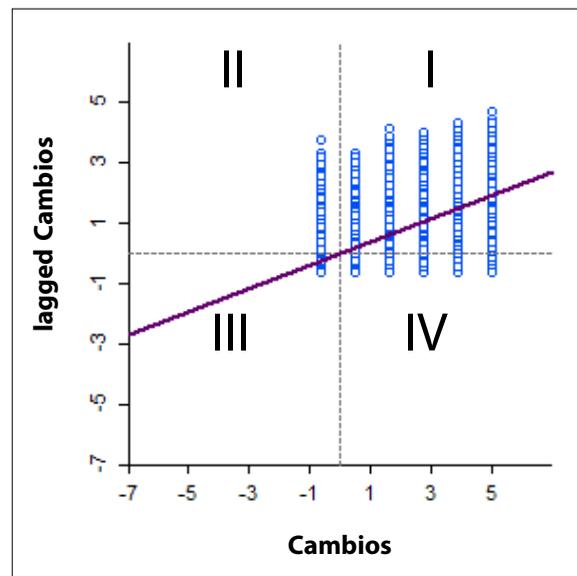


Figura 11. Diagrama de dispersión del índice de Moran para la intensidad de cambio de uso de suelo en México y cuatro tipos de intensidad.

encuentran en esta clasificación donde han presentado entre cambios entre 26% y 30% de su superficie siguen el siguiente orden de mayor a menor selvas altas y medianas > vegetación secundaria de bosques > vegetación secundaria de selvas. En el 5% se observó intensidad media de cambio, donde

las 9 categorías de superficies arboladas mostraron cambios que afectaron aproximadamente el 6% de su extensión en promedio (Figura 12). La intensidad de cambio de uso de suelo alta se distribuye principalmente al sur del país, en los estados de Chiapas, Campeche, Yucatán y Quintana Roo y

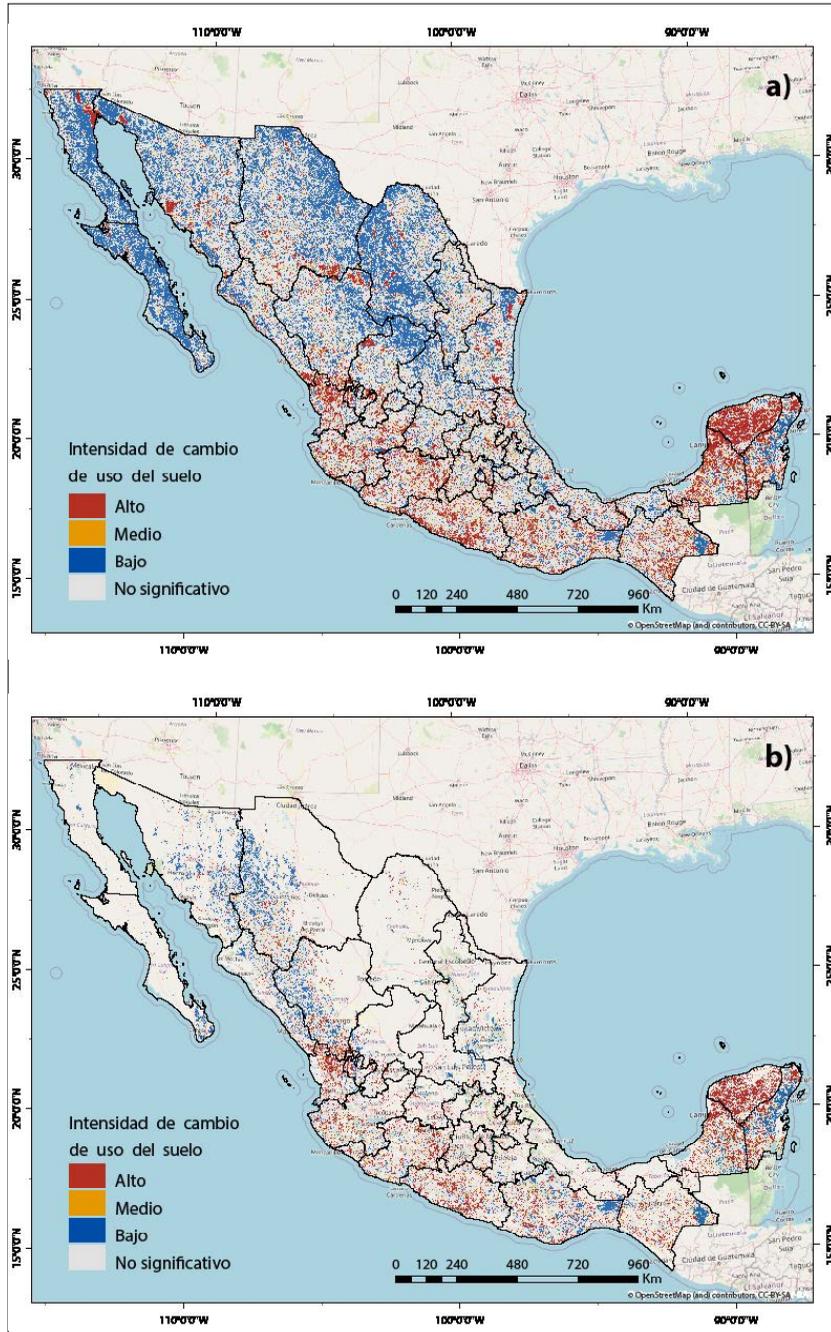


Figura 12. Intensidad en el cambio de uso del suelo en México en el periodo 2001-2018. a) Superficie nacional y b) superficie forestal.

en menor proporción aquellos que coinciden con la sierra madre del sur, sierra madre occidental y el eje volcánico transversal. La intensidad de cambio de uso de suelo bajo, representando a los estados del norte, como son Chihuahua, Coahuila, Baja California y Baja California Sur, principalmente. En menor proporción, la intensidad de cambio medio se distribuye a lo largo del país, principalmente en los estados de Guerrero, Jalisco, México, Michoacán, Morelos, Nayarit y Yucatán.

La intensidad de cambio alta coincide con lo reportado por Leyva-Ovalle *et al.* (2017) para el periodo del 2004-2014, los autores aseguran que la selva baja han sido las más afectadas principalmente por factores como huracanes, incendios y la agricultura de roza-tumba y quema, así como la tala indiscriminada. Caso contrario ocurre con las coníferas y latifoliada, donde el manejo forestal ha permitido la conservación de estas categorías (Flores *et al.*, 2021), para el caso específico de las localizadas en el norte del país. Aquellos estados con más del 20% de su superficie forestales con alta intensidad de cambio: Campeche, Nayarit y Tabasco, mientras que Yucatán es de 65%.

Baja California, Chihuahua, Durango, Oaxaca, Quintana Roo, San Luis Potosí, Sinaloa y Sonora son los estados con más del 20% y Baja California Sur con el 50% de su superficie forestales con media intensidad. Información que podría estar respaldada para los estados de Durango, Sinaloa y Sonora, que de acuerdo con el monitorearon la degradación forestal, registran proceso de degradación (Leyva-Ovalle *et al.*, 2017).

Baja California Sur es el estado con 10% de su superficie forestales con baja intensidad, el resto de los estados están por debajo. La escasa modificación en el uso del suelo se observa principalmente en la región septentrional de México, y estas áreas se caracterizan por conservar su vegetación. No obstante, debido a su idoneidad para la cría de ganado, ya que ofrecen pastizales fundamentales como alimento, se ha registrado una pérdida de vegetación debido a la compactación y erosión del suelo (Davies *et al.*, 2012; Jurado-Guerra *et al.*, 2021).

CONCLUSIONES

La aplicación de la metodología de intensidad de cambio de Aldwaik y Pontius en este estudio ha permitido una comprensión profunda de la dinámica del uso del suelo y la cobertura vegetal en México a lo largo de cinco intervalos de tiempo. Con esta metodología, se pudo identificar patrones de cambio tanto a nivel nacional como regional, lo que proporciona información crucial sobre las tendencias de deforestación, la expansión urbana y el impacto de las actividades agropecuarias en diferentes áreas del país.

Al emplear esta metodología, se pudo determinar con mayor precisión la intensidad y dirección de los cambios en las categorías de cobertura de suelo, esto es fundamental para comprender la evolución del paisaje a lo largo del tiempo. Los resultados obtenidos permiten identificar áreas con alta intensidad de cambio, donde la deforestación y la conversión de tierras forestales en áreas urbanas o agrícolas son más pronunciadas, así como áreas con cambios mínimos, que conservan su vegetación original.

La intensidad del cambio de uso de suelo y vegetación en el país es dinámica en el tiempo y en el espacio. Se encontró que 40% de la superficie nacional ha presentado algún cambio de uso del suelo, es decir, presentan tendencias similares de deforestación, urbanización, o cambios en la cobertura vegetal. El análisis espacial a nivel nacional capturó la complejidad que abarcan todas las categorías de uso en el país. A esta escala se revelan los efectos de patrones macroeconómicos, sociales y ambientales que han impulsado el cambio de uso.

La pérdida de cobertura forestal se ha mantenido activa en los últimos años, alcanzando una pérdida del 10%, mientras que la vegetación de matorrales y pastizales se ha mantenido relativamente estable, es importante señalar que también ha sufrido una reducción del 4% de su superficie. Por ello, es importante mantener información precisa sobre la evolución del paisaje a lo largo del tiempo para comprender los patrones de cambio y evaluar los impactos ambientales y sociales de las actividades humanas. En este sentido se requiere dar seguimiento y continuidad a la cartografía de

uso de suelo que se genera de forma oficial y a escala nacional en México. Es posible que nuevos trabajos aborden la intensidad del cambio de uso de suelo, pero con información verificada en campo.

El trabajo aquí presentado aporta orientación para la toma de decisiones particularmente aquellas orientadas a la conservación de los recursos forestales. La visión nacional permite orientar la toma de decisiones en todos los niveles de gobierno, así como promueve una comprensión nacional en conjunto.

Los datos utilizados provienen de las series de uso de suelo y vegetación del INEGI. La variación en los resultados de los cambios de uso de suelo podría ser atribuible a las diferentes metodologías oficiales como por otros estudios citados. Es crucial reconocer que las disparidades en las metodologías de cartografía y análisis pueden tener un impacto significativo en los resultados. Por ende, es esencial considerar estas diferencias al interpretar los hallazgos y al comparar con otros estudios. Destaca la importancia de la transparencia en los métodos y la necesidad de abordar estas discrepancias para una adecuada interpretación de los datos.

REFERENCIAS

- Aldwaik, S. Z. y Pontius, R. G. (2012). Paquete Intensity analysis to unify measurements of size and stationarity of land changes by interval, category, and transition. En *Landscape and Urban Planning*, 106(1). <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.02.010>
- Aldwaik, S. Z. y Pontius, R. G. (2013). Map errors that could account for deviations from a uniform intensity of land change. *International Journal of Geographical Information Science*, 27(9), 1717-1739. <https://doi.org/10.1080/13658816.2013.787618>
- Castelan Vega, R., Ruíz Careaga, J., Linares Fleites, G., Pérez Avilés, R. y Tamariz Flores, V. (2007). Dinámica de cambio espacio-temporal de uso del suelo de la subcuenca del río san marcos, Puebla, México. *Investigaciones Geográficas*, (64), 78-89. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.14350/rig.17967>
- CEPAL. (2021). *Temas Estadísticos de la CEPAL No 2. La pérdida de los bosques de América Latina y el Caribe 1990-2020: evidencia estadística*. <https://fra-platform.herokuapp.com/>
- Chiu, H. W. y Yeh, P. (2023). Quantifying the impact of green infrastructure change on landscape patterns using intensity analysis and landscape metrics in the Taipei metropolitan area. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(7). <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11384-6>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2009). *Balance preliminar de las economías de América Latina y el Caribe*. CEPAL.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2020). *Estimación de la tasa de deforestación en México para el periodo 2001-2018 mediante el método de muestreo*. CONAFOR. www.gob.mx/conafor
- CONAZA-UACH. (2023). *Informe nacional 2022 de acciones contra la desertificación, degradación de tierras y sequía en México*. Comisión Nacional de Zonas Áridas.
- Concepción Cuevas, E. D. (2022). Expansión urbana o cómo el suelo urbanizado se dispersa por el paisaje: Implicaciones para la conservación de la biodiversidad. *Ecosistemas*, 31(1), 1-11. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2165>
- Davies, J., Poulsen, L., Schulte-Herbrüggen, B., Mackinnon, K., Crawhall, N., Henwood, W. D., Dudley, N., Smith, J. y Gudka, M. (2012). *Conservación de la biodiversidad de las tierras áridas*. UICN.
- Espinal Erquizio, A. y Ramírez Rodríguez, R. (2014). La recesión de 2009 y la expansión 2010-2012 en las entidades federativas de México. En *Estudios Fronterizos*, 15(30). <https://doi.org/10.21670/ref.2014.30.a07>
- Evangelista Oliva, V., López Blanco, J., Caballero Nieto, J. y Martínez Alfaro, Á. M. (2010). Patrones espaciales de cambio de cobertura y uso del suelo en el área cafetalera de la sierra norte de Puebla. *Investigaciones Geográficas*, 72, 23-38.
- Exavier, R. y Zeilhofer, P. (2020). OpenLand: Software for Quantitative Analysis and Visualization of Land Use and Cover Change. *The R Journal*, 12(2), 372-387. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3685229>
- Farfán Gutiérrez, M., Rodríguez-Tapia, G. y Mas, J. F. (2016). Análisis jerárquico de la intensidad de cambio de cobertura/uso de suelo y deforestación (2000-2008) en la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán, México. *Investigaciones Geográficas*, (90), 89-104. <https://doi.org/10.14350/rig.48600>
- Figueroa-Jáuregui, M. L., Ibáñez-Castillo, L. A., Arteaga-Ramírez, R., Arellano-Monterrosas, J. L. y Vázquez-Peña, M. (2011). Cambio de uso de suelo en la cuenca de San Cristóbal de las Casas, México. *Agrociencia*, 45(5), 531-544.
- Flores, A., Romero-Sánchez, M. E., Pérez-Miranda, R., Pineda-Ojeda, T. y Moreno-Sánchez, F. (2021). Potencial de restauración de bosques de coníferas en zonas de movimiento de germoplasma en México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 12(63). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i63.813>
- Galicia, L., Gamboa Cáceres, A., Cram, S., Chávez Vergara, B., Peña Ramírez, V., Saynes, V. y Siebe, C.

- (2015). Almacén y dinámica del carbono orgánico del suelo en bosques templados de México. *Terra Latinoamericana*, 35, 1-29.
- Galindo Aguilar, R. E., Pérez Hernández, M. J., Reynoso Santos, R., Rosas-Rosas, O. y González Gervacio, C. (2019). Land-use change, landscape fragmentation and the conservation of *Leopardus pardalis* Linnaeus, 1758. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 10(52). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v10i52.395>
- González Higuera, R., Aguilar Dorado, M. Á. y Filloy Ramos, E. (2019). *Política migratoria del gobierno de México 2018-2024*.
- INEGI. (2017). *Encuesta Nacional Agropecuaria 2017*. INEGI.
- INEGI. (2020). *Principales resultados Censo de población y vivienda 2020*. INEGI. www.inegi.org.mx
- IPCC. (2021). Climate Change 2021 The Physical Science Basis. En V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu y B. Zhou (Eds.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. WMO, UNEP.
- Jurado-Guerra, P., Velázquez-Martínez, M., Sánchez-Gutiérrez, R. A., Álvarez-Holguín, A., Domínguez-Martínez, P. A., Gutiérrez-Luna, R., Garza-Cedillo, R. D., Luna-Luna, M. y Chávez-Ruiz, M. G. (2021). The grasslands and scrublands of arid and semi-arid zones of Mexico: Current status, challenges and perspectives. En *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 12), 261-285).
- Latorre-Cárdenas, M. C., González-Rodríguez, A., Godínez-Gómez, O., Arima, E. Y., Young, K. R., Denvir, A., García-Oliva, F. y Ghilardi, A. (2023). Estimating Fragmentation and Connectivity Patterns of the Temperate Forest in an Avocado-Dominated Landscape to Propose Conservation Strategies. *Land*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/land12030631>
- Leyva-Ovalle, Á., Valdez-Lazalde, J. R., de los Santos-Posadas, H. M., Martínez-Trinidad, T., Herrera-Corredor, J. A., Lugo-Espinosa, O. y García-Nava, J. R. (2017). Monitoreo de la degradación forestal en México con base en el inventario nacional forestal y de suelos (Infys). *Madera Bosques*, 23(2), 69-83. <https://doi.org/10.21829/myb.2017.2321431>
- López, G. M. y Flores, A. (2020). Economic importance of pine (*Pinus* spp.) as a natural resource in Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 11(60). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i60.720>
- López-Jiménez, L. N., Durán-García, R. y Dupuy-Rada, J. M. (2019). Recovery of structure, diversity and composition of a tropical Semievergreen forest in Yucatan, Mexico. *Madera y Bosques*, 25(1). <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2511587>
- Manuel Barrera, J., Madrid, L. y Hernández, K. (2001). *La producción forestal en México a lo largo del tiempo: avances y retrocesos*. CCMSS. www.ccmss.org.mx.
- Maza-Villalobos, S., Sosa, E. A., Rodríguez, A. D. A., Infante, F. y Castillo-Santiago, M. A. (2023). Land use soil and vegetation dynamic in landscapes highly modified by agricultural activities in southern Mexico. *Botanical Sciences*, 101(2), 374-386. <https://doi.org/10.17129/botsci.3148>
- McGrath, D. y Zhang, C. (2003). Spatial distribution of soil organic carbon concentrations in grassland of Ireland. *Applied Geochemistry*, 18(10), 1629-1639. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(03\)00045-3](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(03)00045-3)
- Monárrez-González, J. C., Pérez-Verdín, G., López-González, C., Márquez-Linares, M. A. y González-Elizondo, M. D. S. (2018). Effects of forest management on some ecosystem services in temperate forest ecosystems of Mexico. *Madera y Bosques*, 24(2). <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2421569>
- Monjardín-Armenta, S. A., Pacheco-Angulo, C. E., Plata-Rocha, W. y Corrales-Barraza, G. (2017). La deforestación and sus factores causales en el estado de Sinaloa, México. *Madera Bosques*, 23(1), 7-22. <https://doi.org/10.21829/myb.2017.2311482>
- Pérez-Vega, A., García, H. H. R. y Mas, J. F. (2020). Environmental degradation from land-cover and use change processes from a spatial perspective in the state of Guanajuato, Mexico. *Investigaciones Geográficas*, 103. <https://doi.org/10.14350/RIG.60150>
- Rivas-Rivas, M. B., Ramírez-Marcial, N., Perales, H., Levy-Tacher, S. I. y Bonfil, C. (2017). Supervivencia y crecimiento de tres especies de *Quercus* bajo condiciones contrastantes de cobertura en el sur de México. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 23(2), 275-288. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2017.01.001>
- Rosete-Vergés, F. A., Luis Pérez-Damián, J., Villalobos-Delgado, M., Navarro-Salas, E. N., Salinas-Chávez, E. y Remond-Noa, R. (2014). *El avance de la deforestación*. 20, 21-35.
- Sáenz-Romero, C., Lindig-Cisneros, R. A., Joyce, D. G., Beaulieu, J., Bradley, J. S. C. y Jaquish, B. C. (2016). Assisted migration of forest populations for adapting trees to climate change. En *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 22(3), 303-323). <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2014.10.052>
- Sánchez Colón, S., Flores Martínez, A., Cruz-Leyva, I. A. y Velázquez, A. (2009). Estado y transformación de los ecosistemas terrestres por causas humanas. En *Capital natural de México, vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio* (pp. 75-129). CONABIO.

- Sánchez, L. E. C. y Acosta, R. A. (2018). Deported mexican migrants and their plans to reenter the United States at the beginning of donald trump's administration. *Revista Mexicana de Ciencias Políticas y Sociales*, 63(233), 43-68. <https://doi.org/10.22201/fcps.2448492xe.2018.233.62603>
- SEMARNAT. (2019). *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México, edición 2018*. SEMARNAT.
- Serra, P. y Salvati, L. (2022). Land Change Science and the STEPLand Framework: An Assessment of Its Progress. En *Land*, 11(7). <https://doi.org/10.3390/land11071065>
- Soto-Cortés, J. J. (2016). La modificación del suelo agrícola a urbano en el municipio de Texcoco, estado de México. *Revista Espacio I+D Innovación más Desarrollo*, 5(10), 106-132. <https://doi.org/10.31644/IMASD.10.2016.a05>
- Velasco-Murguía, A., del Castillo, R. F., Rös, M. y Rivera-García, R. (2021). Successional pathways of post-milpa fallows in Oaxaca, Mexico. *Forest Ecology and Management*, 500. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119644>
- Velázquez, A., Mas, J., Díaz Gallegos, J., Mayorga Saucedo, R., Alcántara, P., Castro, R., Fernández, T., Bocco, G., Ezcurra, E. y Palacio, J. (2002). Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México. *Gaceta Ecológica*, (62), 21-37.
- Verburg, P. H., Crossman, N., Ellis, E. C., Heinimann, A., Hostert, P., Mertz, O., Nagendra, H., Sikor, T., Erb, K. H., Golubiewski, N., Grau, R., Grove, M., Konaté, S., Meyfroidt, P., Parker, D. C., Chowdhury, R. R., Shibata, H., Thomson, A. y Zhen, L. (2015). Land system science and sustainable development of the earth system: A global land project perspective. *Anthropocene*, 12, 29-41. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2015.09.004>
- Wang, H., Feng, R., Li, X., Yang, Y. y Pan, Y. (2023). Land Use Change and Its Impact on Ecological Risk in the Huaihe River Eco-Economic Belt. *Land*, 12(6), 1247. <https://doi.org/10.3390/land12061247>
- Williams-Linera, G. (2015). El bosque mesófilo de montaña, veinte años de investigación ecológica ¿qué hemos hecho y hacia dónde vamos? *Madera y Bosque*, 21, 51-61.
- Zhao, Y., Kasimu, A., Gao, P. y Liang, H. (2022). Spatio-temporal Changes in The Urban Landscape Pattern and Driving Forces of LUCC Characteristics in The Urban Agglomeration on The Northern Slope of The Tianshan Mountains from 1995 to 2018. *Land*, 11(10). <https://doi.org/10.3390/land11101745>