

Cambios de cobertura/uso del suelo y fuerzas impulsoras a lo largo de dos décadas en Zinapécuaro, Michoacán, México

Land cover/use changes and driving forces over two decades in Zinapécuaro, Michoacán, Mexico

Lucero Pimienta-Ramírez¹
Erna Martha López Granados²
Salvador García Espinosa³

Recibido 1 de julio de 2024; aceptado 30 de noviembre de 2024

RESUMEN

Los estudios sobre el cambio de cobertura y uso del suelo (CCUS), son fundamentales para comprender las transformaciones ambientales, impulsado por factores socioeconómicos que afectan la sostenibilidad de los territorios locales y regionales. Esta investigación analiza las dinámicas del CCUS y las fuerzas impulsoras en el municipio de Zinapécuaro (porción que se ubica en la cuenca de Cuitzeo), Michoacán, México, entre 2000 y 2020. El análisis se realizó mediante la interpretación visual de una imagen sentinel-2A del año 2020, un mapa de cobertura y uso del suelo (CUS) del año 2000 y variables socioeconómicas (población, localidades y actividad agrícola). Los resultados indican una confiabilidad aceptable en la interpretación de las clases de CUS (Coeficiente de Kappa=87%). Entre los cambios destacados se observó una disminución en la superficie de la cobertura natural como los bosques (-10.5%) y la porción del lago de Cuitzeo (-4%). En contraste, los principales usos antrópicos

¹ Facultad de Economía, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), México., correo electrónico: lucero.pimienta@umich.mx. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5576-978X>

² Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), México, correo electrónico: erna.lopez@umich.mx. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3998-3019>

³ Facultad de Arquitectura, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), México, correo electrónico: salvador.garcia.espinosa@umich.mx. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7871-5837>

experimentaron un incremento como los asentamientos humanos (64.5%) y pastizales (27.2%). Por otra parte, se identificó superficie destinada a los cultivos protegidos (92.7 ha). Las fuerzas impulsoras observadas son el aumento de la población rural y el crecimiento de las localidades rurales. Este estudio representa el primer análisis detallado del CCUS en esta zona, proporcionando información clave para la planificación y gestión sostenible del territorio.

Palabras clave: *Sentinel-2A, coeficiente de Kappa, matriz de transición, bosques, asentamientos humanos.*

ABSTRACT

Studies on land cover and land use change (LCLUC) are essential for understanding environmental transformations driven by socioeconomic factors that affect the sustainability of local and regional territories. This research examines the dynamics of LCLUC and its driving forces in the municipality of Zinapécuaro (partially located within the Cuitzeo Basin), Michoacán, Mexico, between 2000 and 2020. The analysis was conducted through the visual interpretation of a Sentinel-2A image from 2020, a land cover and land use (LCLU) map from 2000, and socioeconomic variables, including population, settlements, and agricultural activity. The results indicate acceptable reliability in the interpretation of LCLU classes (Kappa coefficient = 87%). Among the notable changes, a decrease in natural cover, such as forests (-10.5%) and the portion of Lake Cuitzeo (-4%), was observed. In contrast, major anthropogenic uses experienced an increase, including human settlements (64.5%) and grasslands (27.2%). Additionally, 92.7 hectares were identified as areas allocated for protected crops. The driving forces observed include rural population growth and the expansion of rural settlements. This study represents the first detailed analysis of LCLUC in this area, providing key information for sustainable territorial planning and management.

Key words: *Sentinel-2A, Kappa coefficient, transition matrix, forests, human settlements.*

1. Introducción

El cambio en la cobertura y uso del suelo (CCUS) a nivel global se ha identificado como un factor crucial en los procesos de degradación ambiental, siendo un tema central en numerosos estudios sobre sostenibilidad y conservación (Ahmad y Satrovic, 2023; Anthony *et al.*, 2024; Arfasa *et al.*, 2024). Este fenómeno a nivel local y regional contribuye a la transformación de los paisajes locales (Belfiore *et al.*, 2024; Chaparro *et al.*, 2024; Dembélé *et al.*, 2024) y representa una amenaza directa para la conservación de los ecosistemas y la biodiversidad (Cabral *et al.*, 2021; Anthony *et al.*, 2024; Ren *et al.*, 2024). Además, la modificación de la cobertura terrestre juega un papel central en la regulación del clima (Sun *et al.*, 2024), los ciclos hidrológicos (Eshita *et al.*, 2024) y la productividad de los

suelos, exacerbando la desertificación (Mięsiak y Turczyński, 2024), la pérdida de carbono orgánico (Niu *et al.*, 2024) y el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero (Berhanu *et al.*, 2023).

En México, el CCUS se ha intensificado significativamente en las últimas décadas, impulsado por una expansión urbana acelerada (Rodríguez *et al.*, 2020; Carpio *et al.*, 2021; Ruiz *et al.*, 2021; Sandoval *et al.*, 2023) y el auge de monocultivos como el aguacate (Arima *et al.*, 2022). Además, la agricultura protegida ha transformado los campos de cultivo tradicional en zonas de producción de árboles frutales, flores y hortalizas (Ortiz *et al.*, 2023). Paralelamente, la pérdida de cobertura forestal (Ret *et al.*, 2024) y los efectos del cambio climático están generando un impacto crítico en los recursos hídricos, con una disminución alarmante del agua superficial en lagos y humedales, fenómeno evidente en las regiones sur (Marisa *et al.*, 2024; Vela *et al.*, 2024), centro (Manley *et al.*, 2022; Roy *et al.*, 2024) y norte del país (Lee *et al.*, 2021). Estos cambios reflejan una convergencia de presiones ambientales y socioeconómicas que demandan estrategias urgentes para la gestión sostenible del territorio y la preservación de los recursos naturales.

El municipio de Zinapécuaro, ha experimentado en las últimas décadas un crecimiento demográfico y económico significativo. Estos cambios ejercen una fuerte presión sobre los recursos naturales, resultando en una notable pérdida de cobertura forestal (Benítez, 2022). Sin embargo, no se han realizado estudios detallados que cuantifiquen los CCUS en esta zona geográfica, por lo que esta investigación representa el primer análisis. El objetivo fue cuantificar los cambios en la cobertura y los usos del suelo entre 2000 y 2020 e identificar las fuerzas impulsoras detrás de estas transformaciones en el municipio de Zinapécuaro, el cual abarcó el 71.4% de su superficie total, ubicado dentro de la cuenca del lago de Cuitzeo. La investigación se enfocó en responder dos preguntas fundamentales: ¿cuáles han sido los principales cambios en la cobertura y el uso del suelo durante las últimas dos décadas? y ¿cuáles son las causas impulsoras de la transformación del entorno natural? Los resultados de este estudio buscan no solo documentar los cambios observados, sino también proporcionar una base científica para el diseño de estrategias efectivas que permitan la toma de decisiones informada, para lograr un equilibrio entre el desarrollo económico y la conservación de los recursos naturales en la zona de estudio.

2. Materiales y métodos

2.1 Área de estudio

El municipio de Zinapécuaro se localiza al noroeste del estado de Michoacán, entre los paralelos 19° 44' y 19° 59' de latitud norte, los meridianos 100° 35' y 100° 59' de longitud oeste y tiene una superficie aproximada de 596 km² el cual representa el 0.98% del territorio estatal. Presenta una altitud entre los 1,900 y 3,100 metros sobre el nivel del mar (msnm) (INEGI, 2010).

Esta investigación se centra en una fracción del municipio que abarca 425 km² correspondiente al 71.4% de la superficie total, territorio que se encuentra dentro de la cuenca del lago de Cuitzeo (Figura 1). La selección de esta fracción del municipio, responde principalmente a la disponibilidad de datos precisos y confiables, como el mapa de cobertura y uso del suelo del año 2000 (López et al., 2006), el cual proporciona una base sólida para realizar análisis longitudinales de alta calidad. Además, esta zona presenta una relevancia ambiental importante ya que se encuentra una porción del lago de Cuitzeo de aproximadamente 63.6 km² y alberga extensas áreas de vegetación natural. Por otra parte, la región refleja dinámicas sociales y económicas clave, como el crecimiento demográfico y la intensificación de actividades económicas, que conlleva a transformaciones significativas en el territorio.

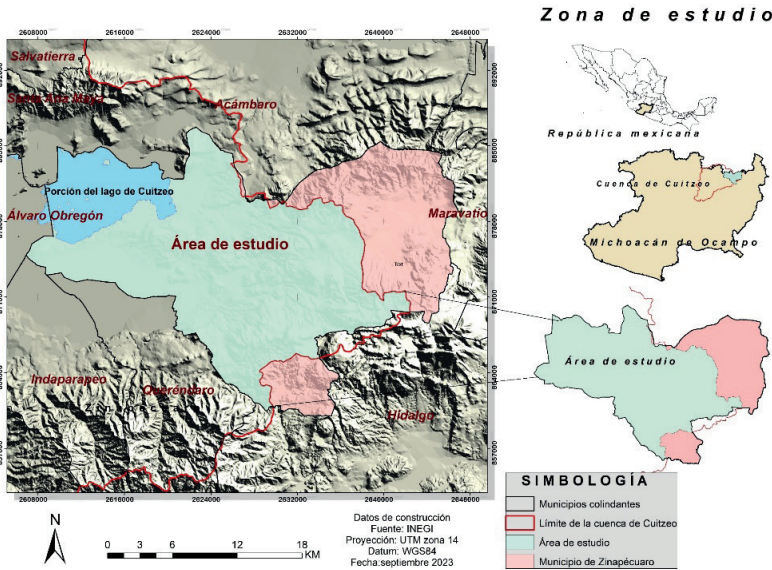


Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio en el municipio de Zinapécuaro.
Fuente: elaboración propia.

2.2 Fuente y procesamiento de los datos espaciales

La caracterización de la cobertura y el uso del suelo (CUS) en el año 2020 (tiempo 2), se realizó utilizando una imagen satelital Sentinel-2A, con una resolución espacial de 10 metros, obtenida de la plataforma oficial de Copernicus Data Space Ecosystem (<https://dataspace.copernicus.eu/>). Las características técnicas de esta imagen se detallan en la Tabla 1. Se realizó una combinación de bandas espectrales B02 (azul), B03 (verde) y B04 (rojo) para generar una composición en color natural, que sirvió como base para la interpretación de las clases de CUS. Los datos correspondientes para el año 2000 (tiempo 1) que

equivale al 71.4% del municipio de Zinapécuaro, se obtuvo de un mapa de CUS derivado de una investigación previa desarrollada en la cuenca del lago de Cuitzeo (López et al., 2006). Este mapa vectorial, fue generado a partir de la interpretación visual de 283 fotografías aéreas pancromáticas en blanco y negro, analizados con un estereoscopio de espejo a una escala de 1:37,000. Toda la información fue proyectada en el sistema de coordenadas WGS84 UTM Zona 14, y el procesamiento y análisis espacial se llevaron a cabo con el software ArcGIS versión 10.5.

Tabla 1. Características de la imagen Sentinel-2A del año 2020

<i>Fecha de adquisición</i>	<i>Escena</i>	<i>Nubosidad (%)</i>	<i>Sensor</i>	<i>Resolución espacial (m)</i>
02/02/2020	T14QKH_20200209T171449_AOT_10m	0.01	Sentinel-2A	10
02/02/2020	T14QLH_20200219T171339_AOT_10m	0.01	Sentinel-2A	10
02/02/2020	T14QLG_20200219T171339_AOT_10m	0.01	Sentinel-2A	10

Fuente: elaboración propia a partir de datos de la Agencia Espacial Europea. <https://dataspace.copernicus.eu>

2.2.1. Interpretación y clasificación de la imagen Sentinel-2A

La interpretación y clasificación de las coberturas y los usos del suelo para el año 2020, se realizó a través de la imagen Sentinel-2A en color natural. La técnica de interpretación fue visual y en pantalla siguiendo los lineamientos establecidos por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 1996). Para este procedimiento se consideraron algunas características en la imagen como la textura, el color y patrones de formas. Además, se consideró el conocimiento y la experiencia de expertos en el área de estudio, trabajo de campo y herramientas de información geográfica del Google Earth. La interpretación de la información se llevó a cabo a una escala de 1:50,000 a través de herramientas del Software ArcGis versión 10.5. Para la clasificación y etiquetado de los polígonos, se establecieron 12 categorías generalizadas de cobertura y uso del suelo (CUS), basadas en las clases originales del año 2000, que incluyeron bosque, matorral, pastizal, cultivos, lagos, plantaciones de árboles, vegetación acuática, asentamientos humanos, embalses de agua, zonas de inundación y áreas erosionadas. Estas clases, propuestas originalmente por López *et al.* (2006), fueron actualizadas para el análisis del año 2020, integrando información complementaria del INEGI (2011) y Daniele *et al.* (2023). Además, se incorporó la clase de cultivo protegido, reflejando los cambios recientes en la dinámica del uso del suelo en Zinapécuaro (Tabla 2).

Tabla 2. Clases de cobertura y usos del suelo

<i>Clases</i>	<i>Descripción</i>
Bosque	Asociaciones de árboles representada por bosques de pino, bosques de encino, bosques de abeto y bosques mixtos de coníferas
Matorral	Vegetación antrópica con ramificación desde la base del tallo. Generalmente, su altura es menor a 4 m. En la zona, está principalmente representada por matorral subtropical caducifolio
Pastizal	Formada por vegetación herbácea no leñosa, considerada dominante en términos de porcentaje de cobertura (> al 75%)
Cultivos	Incluye el cultivo de temporal donde el ciclo vegetativo de los cultivos depende del agua de lluvia y los cultivos de riego, utilizan agua suplementaria para el desarrollo de los cultivos durante el ciclo agrícola
Cultivo protegido	Coberturas agrícolas que utilizan tecnología de baja y alta sofisticación para modificar factores ambientales locales, como la precipitación, el riego, la temperatura, la radiación, el viento, la humedad y la evapotranspiración. Esta práctica incluyen el cultivo en ambientes controlados, como los invernaderos (Daniele <i>et al.</i> , 2023)
Asentamientos humanos	Zonas urbanas o rurales
Plantaciones de árboles	Elementos arbóreos plantados por el ser humano, como plantaciones de eucalipto y coníferas, que presentan una disposición espacial bien definida. Los huertos frutales se consideran por separado
Lagos	Representa la porción del lago de Cuitzeo
Vegetación acuática	Asociaciones vegetales ubicadas en o adyacentes a cuerpos de agua
Zona de inundación	Áreas con erosión hídrica severa
Embalses de agua	Pequeños embalses artificiales utilizados para riego o como puntos de abastecimiento de agua
Áreas erosionadas	Suelo erosionado, desprovistos de vegetación

Fuente: elaborado a partir de López *et al.* (2006), INEGI (2011) y Daniele *et al.* (2023).

2.3 Evaluación de la fiabilidad temática

La evaluación de la fiabilidad temática se llevó a cabo mediante una matriz de confusión (Mas *et al.*, 2003). Además, se revisó en campo el 10% de los polígonos para cada una de las categorías, a través de una técnica de muestreo al azar. También se empleó herramientas del Google Earth para validar algunos polígonos en áreas inaccesibles. De esta matriz se calcularon algunos índices de confiabilidad temática (Tabla 3) (Camacho *et al.*, 2020; Chebby *et al.*, 2023; Fikadu y Olika, 2023).

Tabla 3. Índices de confiabilidad temática

<i>Índice</i>	<i>Descripción</i>
La precisión del usuario	$= \frac{\text{número de la diagonal}}{\text{total de la fila}} * 100$
La precisión del productor	$= \frac{\text{número de la diagonal}}{\text{total de la columna}} * 100$
La precisión general	$= \frac{\text{número de valores clasificados correctamente}}{\text{número total de valores}} * 100$
Coficiente de kappa (K)	$= \frac{\text{precisión observada} - \text{precisión al azar}}{\text{precisión máxima} - \text{precisión al azar}} * 100$

Fuente: elaborado a partir de Mas *et al.* (2003) y Kuma *et al.* (2022).

2.4 Detección del CCUS entre el año 2000 y 2020

El análisis de los CCUS se llevó a cabo a través de la combinación de un mapa de cobertura y uso de suelo del año 2000 (tiempo 1) y del año 2020 (tiempo 2) como resultado de la imagen Sentinel-2A (Hasan *et al.*, 2024; Tilahun *et al.*, 2024). La cuantificación de los cambios fue mediante la construcción de una matriz de transición o tabulación cruzada, tal como se indica en la Ecuación 1 (Pontius *et al.*, 2004). De esta matriz se obtuvieron algunos indicadores como la permanencia, pérdida, ganancia y cambio total (Camacho *et al.*, 2017). También se calculó la tasa de cambio con la Ecuación 2 propuesto por la FAO (1996) y el porcentaje de cambio como se especifica en la Ecuación 3 (Temesgen *et al.*, 2022).

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1j} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{i1} & p_{i2} & \dots & p_{ij} \end{bmatrix}$$

(1)

Donde:
p_{ij}: especifica el área en transición del paisaje *i* a *j*, y cada elemento en la matriz de transición se clasifica suponiendo (1) *p_{ij}* no negativo y (2) $\sum_{nj=1} p_{ij} = 1$
Tasa de cambio

$$t=(S2/S1)^{1/n} - 1$$

(2)

Donde:
S = tasa de cambio (se multiplica por 100 para su expresión en porcentaje)
S1= superficie del mapa del tiempo 1
S2= superficie del mapa del tiempo 2
n= número de años transcurridos entre ambas fechas
Porcentaje del cambio de cobertura y uso del suelo

$$\text{Porcentaje de cambio} = \left(\frac{x_2 - x_1}{x_1} \right) * 100 \quad (3)$$

Donde:

X2= superficie en ha del tiempo 2

X1= superficie en ha del tiempo 1

2.5 Fuerzas impulsoras del cambio de cobertura y uso del suelo

La investigación sobre las causas que impulsan el cambio de cobertura y uso del suelo (CCUS) es crucial para comprender la transformación del paisaje y sus implicaciones (Geist y Lambin, 2002). Estas causas pueden agruparse en fuerzas proximales, las cuales representan las causas directas, como la expansión agrícola, expansión de asentamientos rurales y urbanos, el desarrollo de infraestructura, la extracción de madera y los factores ambientales. En contraste, las fuerzas subyacentes actúan de manera indirecta y abarcan aspectos demográficos, económicos, tecnológicos, culturales, políticos e institucionales, entre otros (Geist y Lambin, 2002; Qasim *et al.*, 2013; Mengistu y Woldetsedik, 2018).

2.5.1 Dinámica poblacional, localidades rurales y urbanas

En esta investigación se realizó un análisis del crecimiento demográfico del área de estudio considerada del municipio de Zinapécuaro (71.4% de la superficie total). Los datos estadísticos se obtuvieron de los censos nacionales del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), del periodo 2000 (N0) y del año 2020 (Nt). Se aplicó la metodología propuesta por Maldonado (2005), donde se calculó la tasa de crecimiento de la población total, como se muestra en la Ecuación 4. Asimismo, se obtuvo la población urbana y rural. Además, se llevó a cabo un análisis detallado del número de localidades urbanas y rurales (Kamran *et al.*, 2023).

$$r = \frac{1}{t} * \frac{Nt - N0}{N0} * 100 \quad (4)$$

Donde:

r= 1/10

r= Tasa de crecimiento

Nt= Población al final del periodo

N0= Población al inicio del periodo

t= Tamaño del intervalo de tiempo

2. 5.2 Dinámica agrícola

El factor económico desempeña un papel crucial en la configuración del uso del suelo agrícola (Bajocco *et al.*, 2018). Por esta razón, se llevó a cabo un análisis descriptivo de la superficie sembrada, la producción económica y la diversidad de cultivos, abarcando el periodo comprendido entre el año 2003 (proporcionó información cercana al tiempo 1) y el año 2020 (tiempo 2). Los datos utilizados

en este estudio fueron recopilados del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2023).

3. Resultados

3.1 Evaluación de la precisión

La precisión de la clasificación del mapa del año 2020 se detalla en la Tabla 4, se obtuvo una precisión global del 94.7% y un coeficiente de kappa del 87%. Estos valores indican que la clasificación de las coberturas y los usos del suelo es confiable y aceptable.

Tabla 4. Índice de la fiabilidad temática del año 2020

Clases	Precisión (%)	
	Productor	Usuario
Bosque	89.4	80.0
Matorral	84.6	91.7
Pastizal	90.0	90.0
Cultivo	94.1	94.2
Cultivo protegido	100	100
Plantaciones de árboles	100	100
Asentamientos humanos	100	100
Lago de Cuitzeo	100	100
Vegetación acuática	100	100
Zona de inundación	100	100
Embalses de agua	100	100
Áreas erosionadas	100	100
Precisión general	96.7	
Coeficiente de kappa	87	

Fuente: elaboración propia.

3.2 Detección de la CUS y los cambios entre 2000 y 2020

Se cuantificaron las CUS (Tabla 5) y su distribución espacial (Figura 2). Para el año 2020, el bosque se destaca como la clase con la mayor superficie de ocupación en la zona de estudio, abarcando aproximadamente 11,950 ha, equivalente al 27.7%. Esta cobertura se distribuye principalmente en las partes más altas, ubicadas al sur y norte de la región. En segundo lugar, se encuentra la superficie destinada a los cultivos con 11,237.9 ha, que corresponde a 26.6% de la superficie total, se localiza en el centro y noroeste de la zona de estudio e incluye cultivos como cereales, forrajes, frutales y hortalizas. La tercera categoría en extensión

corresponde al lago de Cuitzeo, ubicado al norte del municipio de Zinapécuaro, con una superficie de 6,158.9 ha, le sigue el matorral, predominante en el norte de la región, con 6,151.3 ha, ambas clases representan el 14.3% de la superficie total. En conjunto, estas clases abarcan el 82.4% de la superficie del municipio analizado. Además, se registró 92.7 ha de cultivo protegido ubicados en el centro y norte de la zona de estudio.

Tabla 5. Superficie de la CUS y los cambios entre 2000 y 2020

Clases	Año 2000 Superficie (ha)	Año 2020 Superficie (ha)	% de ocupación (2020)	Permanencia	Pérdida/ Ganancia (ha)	Porcentaje de cambio (%)	Tasa de cambio (%)
B	13,362.2	11,955.9	27.7	10,686.5	-1,406.30	-10.5	-0.55
MA	5,773.0	6,151.3	14.3	3,430.4	378.30	6.6	0.31
P	2,830.6	3,600.7	8.4	1,243.4	770.10	27.2	1.21
C	12,129.4	11,237.9	26.0	9,927.9	-891.5	-7.3	-0.4
CP	0.0	92.7	0.2	0.0	92.70	100	0.0
PA	297.2	103.2	0.2	28.6	-194.00	-65.3	-5.1
AH	1,229.2	2,016.8	4.7	1,229.2	787.60	64.5	2.5
LC	6,418.6	6,158.9	14.3	6,115.4	-259.70	-4.0	-0.2
VA	801.4	1,011.7	2.3	748.1	210.30	26.2	1.2
EA	135.4	140.1	0.3	80.5	4.70	3.5	0.2
ZI	77.6	496.2	1.2	39.0	418.60	539.4	9.7
AE	50.5	139.6	0.3	25.5	89.10	176.4	5.2
Superficie total	43,105	43,105	100	32,366.9			

Donde: B= bosque, MA= matorral, P= pastizal, C= cultivo, CP= cultivo protegido, PA= plantaciones de árboles, AH= asentamientos humanos, LC= porción del lago de Cuitzeo, VA= vegetación acuática, ZI= zona de inundación, EA= embalses de agua, AE= áreas erosionadas.

Entre 2000 y 2020, se encontró que las clases de cobertura natural con la mayor pérdida de superficie, son los bosques con el 10.5% (tasa de -0.55 % anual). De acuerdo con la matriz de transición (Tabla 6), esta disminución se asocia principalmente con la expansión de los matorrales (1,993.9 ha) y cultivos (467.8 ha). La porción del lago de Cuitzeo también mostró una reducción del 4.0% (tasa de -0.2 % anual), atribuida a un crecimiento de la vegetación acuática (180.1 ha). En contraste, los usos antrópicos se expandieron como los asentamientos humanos que experimentaron el crecimiento más drástico (64.4%), al pasar de 1,222.2 a 2,016.8 ha, (tasa de 2.5% anual). Esta expansión ocurrió a expensas de áreas destinadas a cultivos (537 ha) y pastizales (149.8 ha). Los pastizales también mostraron un crecimiento del 27.2 % (tasa de 1.21% anual), sobre superficie previamente ocupado por matorrales (1,164.5 ha) y cultivos (1,004.4 ha). Con una excepción de los cultivos que disminuyeron 7.3%, (tasa de -0.4% anual) debido a la expansión de los pastizales (1,004.4 ha) y asentamientos humanos (537 ha). Las áreas erosionadas representan una

categoría menor en términos de superficie total, se expandieron 176.4% (tasa de 5.2% anual). La clase de cultivos protegidos, se han establecido sobre áreas previamente destinadas a cultivos tradicionales (80.7 ha).

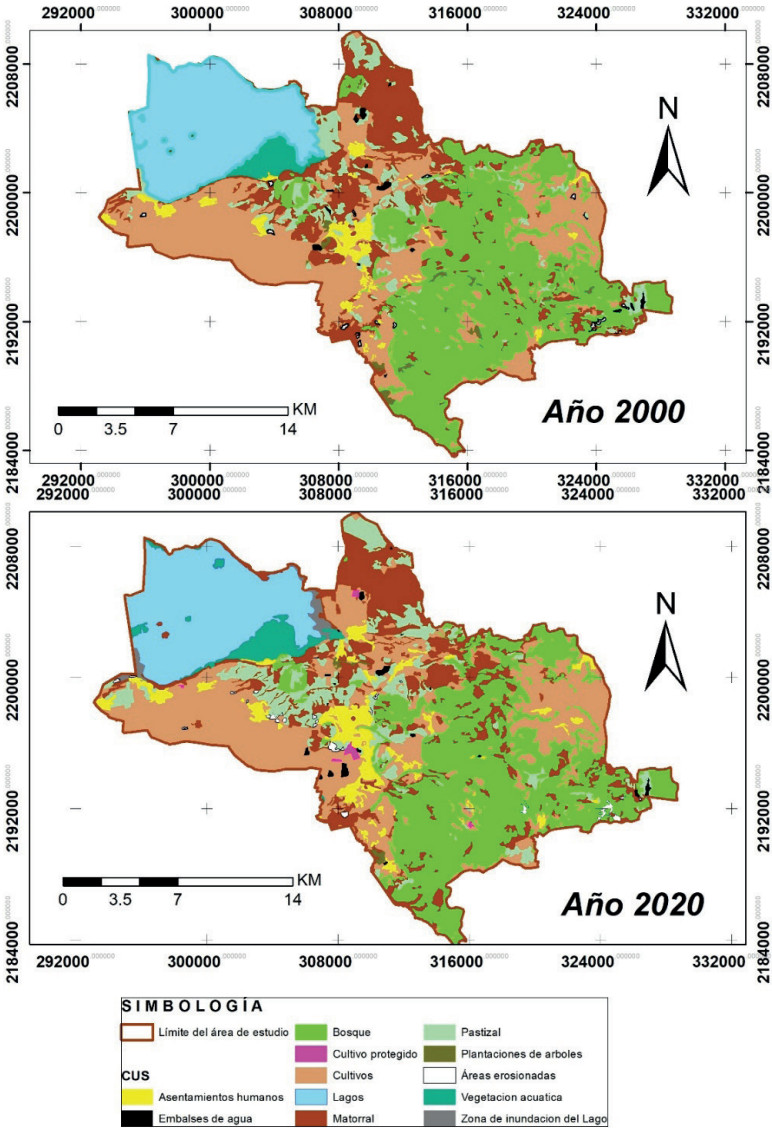


Figura 2. Cobertura y uso del suelo de la zona de estudio en Zinapécuaro entre 2000-2020. Fuente: elaboración propia.

Tabla 6. Matriz de transición entre las CUS del periodo 2000-2020

Clases	B	MA	P	C	CP	LC	AH	VA	PA	EA	ZI	AE	Total general
B	10,686.5	1,993.9	182.5	467.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	31.5	13,362.2
MA	700.9	3,430.4	1,164.5	244.1	0.0	0.0	83.9	28.1	74.6	0.0	16.7	29.7	5,773.0
P	99.1	315.6	1,243.4	537.4	11.9	5.2	149.8	41.3	0.0	10.5	391.1	25.2	2,830.6
C	260.6	227.9	1,004.4	9,927.9	80.7	0.0	537.0	14.1	0.0	49.2	0.0	27.5	12,129.4
CP	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
LC	0.0	73.6	0.0	0.0	0.0	6,115.4	0.0	180.1	0.0	0.0	49.5	0.0	6,418.6
AH	0.0	0.0	5.9	0.0	0.0	0.0	1,223.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1,229.2
VA	5.9	12.1	0.0	14.2	0.0	6.4	14.7	748.1	0.0	0.0	0.0	0.0	801.4
PA	191.8	68.7	0.0	0.0	0.0	0.0	8.1	0.0	28.6	0.0	0.0	0.0	297.2
EA	0.0	14.2	0.0	40.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	80.5	0.0	0.0	135.4
ZI	0.0	6.7	0.0	0.0	0.0	31.8	0.0	0.0	0.0	0.0	39.0	0.0	77.6
AE	11.1	8.1	0.0	5.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	25.5	50.5
Total general	11,955.9	6,151.3	3,600.7	11,237.9	92.7	6,158.9	2,016.8	1,011.7	103.2	140.1	496.2	139.6	43,105.0

Donde: B= bosque, MA= matorral, P= pastizal, C= cultivo, CP= cultivo protegido, PA= plantaciones de árboles, AH= asentamientos humanos, LC= porción del lago de Cuitzeo, VA= vegetación acuática, ZI= zona de inundación, EA= embalses de agua, AE= áreas erosionadas.

Fuente: elaboración propia.

3.3 Fuerzas impulsoras del CCUS

3.3.1 Dinámica demográfica, localidades rurales y urbanas

En las últimas dos décadas el área de estudio considerado en este análisis del municipio de Zinapécuaro, ha experimentado un incremento del 4.6% en su población total, creció a una tasa del 0.2%. La población rural predominante, en este periodo aumentó el 26%, mientras que la población urbana disminuyó 14.2%. Adicionalmente, las localidades rurales entre el año 2000 y 2020 experimentaron un crecimiento del 30.4%, pasaron de 46 localidades al inicio del periodo a 60 en el último año. Las localidades urbanas consideran una población superior a los 2,500 habitantes, por debajo de este número son rurales. En el año 2000, Zinapécuaro de Figueroa, Bocaneo y Ucareo eran consideradas localidades urbanas. Sin embargo, en el año 2020, se observó un cambio significativo en esta clasificación, ya que ambas dejaron de ser consideradas como localidades urbanas, al contar con una población de 2,284 y 2,123 habitantes (Figura 3). Aunque estas dinámicas no son drásticas el crecimiento de la población (fuerza subyacente) y de las localidades rurales (fuerza proximal), podrían representar fuerzas impulsoras de los cambios observados.

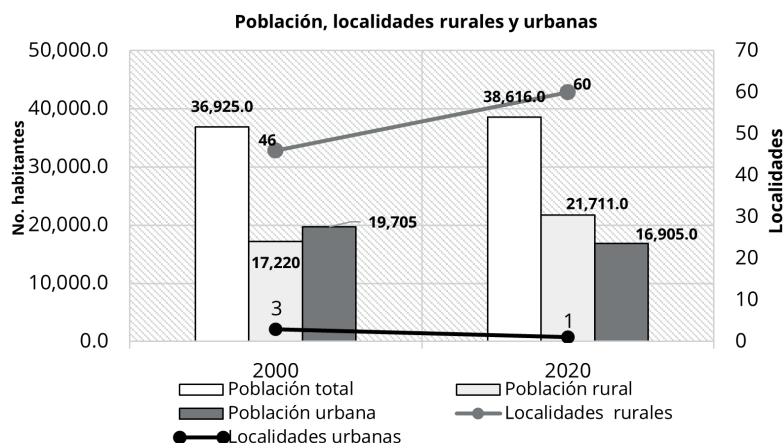


Figura 3. Población, localidades rurales y urbanas del área de estudio en el municipio de Zinapécuaro entre el año 2000 y 2020.

Fuente: elaboración propia.

3.3.2 Dinámica agrícola entre el año 2003 y 2020

Entre los años 2000 y 2020 la superficie destinada a los cultivos del área analizada en Zinapécuaro disminuyó 7.3%, pasando de 12,129.4 a 11,231.9 ha. Para una mayor comprensión de los cambios espaciales observados, se analizaron datos estadísticos agrícolas del SIAP, que abarca la totalidad del municipio de Zinapécuaro. Se registró que entre 2003 y 2020, la superficie total sembrada disminuyó drásticamente en un 48.3%, de 14,707.8 a 7,507.8 ha. Este cambio estuvo principalmente impulsado por la reducción en los cultivos de temporal, cuya superficie cultivada decreció 56.8%, al pasar de 11,787.5 a 5,090.6 ha. Por su parte, los cultivos de riego también mostraron una reducción, aunque menos severa, del 13.9 %, pasaron de 2,920.3 a 2,514.2 ha. Sin embargo, la producción económica se incrementó 161.3% de \$100,036.5 paso a \$261,431.1. La superficie de producción agrícola abarca en primer lugar el cultivo de maíz, predomina con el 52.9% de la superficie total. El segundo lugar lo ocupan las huertas frutales, cuya extensión es de 2,337 ha en 2020 equivalentes al 30.7% de la superficie total. Dentro de esta clase se reportó cultivo de aguacate (140 ha), cuya presencia se ha registrado en la última década. El tercer lugar lo ocupa la producción de granos forrajeros con 1,138.4 ha correspondiente al 15.5%. También se observó 65 ha de agave. Asimismo, la diversidad de cultivos se redujo significativamente, pasando de 21 tipos registrados en 2003 a solo 11 en 2020 (Figura 4).

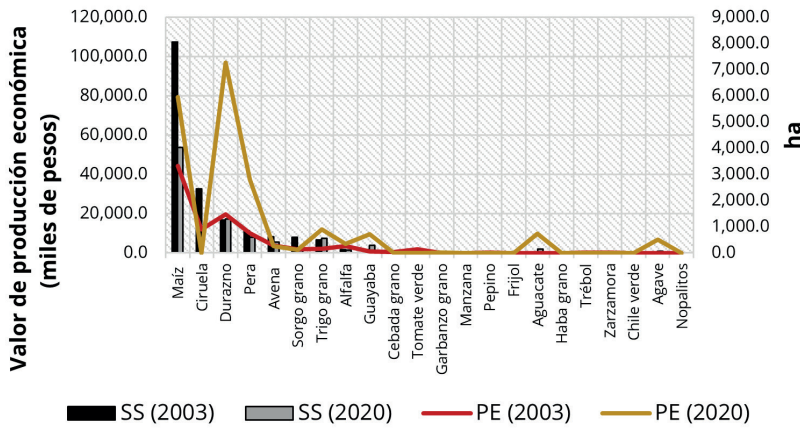


Figura 4. Superficie, producción económica y diversidad de los cultivos en el municipio de Zinapécuaro en el año 2003. Donde: SS: Superficie sembrada y PE: Producción económica.
Fuente: elaboración propia.

4. Discusión

4.1 Detección del CCUS entre 2000 y 2020

Las coberturas de origen natural que están experimentando una disminución importante son las zonas forestales y humedales (Mariye *et al.*, 2022). En esta investigación, se destaca una reducción del 10.5% en la superficie de ocupación de los bosques. Este cambio evidencia la presión ejercida sobre los ecosistemas forestales locales, que enfrentan procesos de conversión hacia otros usos del suelo. Lo observado en este estudio coincide con otras investigaciones que se han llevado a cabo a nivel nacional (Pérez *et al.*, 2021). Además, es consistente con la tendencia global y nacional. La FAO (2020), ha reportado que entre 1990 al 2020 se han perdido el 30% de los bosques en todo el mundo, y la causa de esta pérdida, se debe principalmente, a la expansión de cultivos y a la urbanización. A nivel nacional, la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR, 2020), ha reportado una tasa anual de deforestación de 208 mil 850 ha por año, entre 2001 y 2020, siendo la expansión de pastizales la causa del 76.61% de la reducción de los bosques, con una expansión de 128 mil 552 ha, y los cultivos con 34 mil 066 ha. Este cambio subraya la necesidad de desarrollar acciones integrales en el manejo sostenible de los bosques para mitigar sus efectos y prevenir pérdidas adicionales, considerando que los bosques son la clase con mayor superficie de ocupación en el municipio de Zinapécuaro.

Por otra parte, la porción del lago de Cuitzeo es la segunda clase de cobertura natural que mostró una disminución del 4%. Su extensión presenta variaciones anuales, estrechamente vinculadas a la cantidad de precipitación registrada

durante cada temporada de lluvias (Mendoza *et al.*, 2002). En el contexto del cambio de cobertura y uso del suelo (CCUS), diversos factores podrían influir en esta reducción, incluyendo la disminución de los bosques, la intensificación de la agricultura comercial, el crecimiento poblacional (Luan *et al.*, 2024) y los efectos del cambio climático, que contribuyen a la desecación de los cuerpos de agua (Zhan *et al.*, 2023).

Los usos antrópicos se expandieron de manera considerable como los asentamientos humanos (64.5%). Este crecimiento también ha sido observado en otras partes de México tal como lo señalan Pérez *et al.* (2021). En este estudio, se destaca el incremento de la población rural y el surgimiento de nuevas localidades rurales, que podrían explicar en parte la expansión de esta clase. A diferencia de otras investigaciones que han reportado un incremento de la población urbana (Gordillo y Castillo, 2017), en el caso de Zinapécuaro, las localidades de Bocaneo y Ucareo pasaron de urbanas a rurales (INEGI, 2020). Además, se ha señalado que existe una relación causal entre la expansión de asentamientos humanos con el crecimiento económico y demográfico los cuales conducen drásticamente al cambio de uso del suelo (Tian, 2015; Belčáková *et al.*, 2021; Kuma *et al.*, 2022).

El pastizal es la segunda clase de uso antrópico que experimentó una expansión del 27% en la superficie de ocupación. El crecimiento de esta clase indica un cambio importante en el uso del suelo en esta zona de estudio, posiblemente relacionado con la disminución de las prácticas agrícolas, un patrón que ya se había documentado en décadas anteriores en la región de la cuenca de Cuitzeo, del cual forma parte este municipio (López *et al.*, 2006). Este fenómeno no es exclusivo de esta área, ya que estudios globales han señalado a los pastizales como una clase de uso en constante expansión, impulsada por factores como el abandono agrícola y la ganadería extensiva (Adenle *et al.*, 2022; Damtew *et al.*, 2022).

Los cultivos representan la segunda clase de uso del suelo con mayor superficie en el municipio, durante el periodo de análisis se observó una disminución del 7.3%. De acuerdo con el SIAP (2020), se identificó un cambio significativo en los tipos de cultivos tradicionales de la región. En 2003, se reportaron 21 tipos de cultivos, mientras que para 2020 este número se redujo a solo 11. Este cambio no solo refleja una pérdida de diversidad agrícola, sino también una transformación en las prioridades productivas locales, como la producción de frutas, siendo el sector con el mayor aporte en la producción económica agrícola total (57.8%). En términos de superficie sembrada, el maíz continúa siendo el cultivo más importante, seguido por la producción de frutas. Además, se destaca la presencia emergente de cultivos económicamente más rentables como el aguacate (140 ha) y el agave (65 ha), lo que indica una diversificación hacia productos con mayor demanda en mercados específicos. Aunque la producción de monocultivos como el aguacate y el agave ocupan una superficie menor en comparación con la producción de maíz o frutas en el área de estudio, su expansión podría tener importantes implicaciones ambientales. De acuerdo con lo reportado por Arima *et al.* (2022) y Denvir (2023), señalan

que en Michoacán la intensificación de la producción de aguacate se podría extender en diversos territorios, ocasionando la disminución de los bosques templados y el uso intensivo del agua.

4.2 Fuerzas impulsoras del CCUS entre 2000 y 2020

Identificar las fuerzas impulsoras detrás del cambio de cobertura y uso del suelo a diversas escalas espaciales y temporales, especialmente en el contexto del desarrollo sostenible, resulta fundamental para comprender la compleja relación entre las actividades socioeconómicas y la transformación del entorno natural (Mengistu y Woldetsedik, 2018). De acuerdo con Geist y Lambin (2002) y Qasim *et al.* (2013), en este estudio, se identificaron como fuerzas subyacentes o indirectas el incremento de la población rural y el surgimiento de nuevas localidades rurales, que pasaron de 46 a 60, siendo una fuerza proximal del cambio observado. Este crecimiento poblacional y la expansión de los asentamientos humanos destacan un proceso que refleja una presión constante sobre el uso del suelo en la región. Por otro lado, la dinámica agrícola es una fuerza proximal o directa que podría inducir la disminución de la superficie ocupada por cultivos tradicionales. No obstante, la disminución considerable observada en esta clase sugiere que, aunque la agricultura sigue siendo un componente importante, no es el factor principal detrás de este cambio. Por ello, se subraya la importancia de adoptar un enfoque integral que combine el análisis de datos espaciales con información cualitativa, lo que permitirá identificar con mayor precisión las causas específicas detrás del CCUS en esta región.

5. Conclusiones

El área de estudio en el municipio de Zinapécuaro está representada por cinco clases principales: bosque, cultivos, matorrales, el lago de Cuitzeo y pastizales. Durante las dos décadas analizadas, los bosques experimentaron una reducción significativa del 10.5%, principalmente debido a la expansión de matorrales, huertas y pastizales. Este cambio refleja una presión considerable sobre los ecosistemas forestales de la región. Además, la superficie del lago se ha visto disminuida, en gran parte como resultado del incremento de vegetación acuática. Los asentamientos humanos mostraron el mayor crecimiento (64.4%), ocupando principalmente áreas previamente utilizadas para cultivos y pastizales. Por otra parte, los pastizales han tenido una notable expansión, reemplazando áreas antes ocupadas por matorrales y terrenos agrícolas. Además, se identificó el crecimiento poblacional (fuerza subyacente) y el aumento de localidades rurales (fuerzas proximales) que explican las transformaciones observadas, reflejando una interacción compleja entre las dinámicas humanas y los paisajes rurales. Esta investigación representa el primer esfuerzo bajo este enfoque para identificar y comprender los vínculos entre los CCUS y las dinámicas humanas en un contexto de creciente presión sobre los paisajes rurales de México. Además, los hallazgos registrados aportan una base clave para futuros estudios y para la formulación de estrategias de gestión sostenible del territorio.

Agradecimientos

Esta investigación se llevó a cabo gracias al apoyo de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), a través del programa de Doctorado en Desarrollo y Sustentabilidad de la Facultad de Economía, que proporcionó los recursos necesarios para su realización. Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por la beca otorgada al primer autor, un apoyo crucial que hizo posible concretar este trabajo y contribuir al avance del conocimiento científico.

Bibliografía

- Adenle, A. A., Boillat, S. y Speranza, C. I. (2022). Key dimensions of land users' perceptions of land degradation and sustainable land management in Niger State, Nigeria. *Environmental Challenges*, 8, 100544. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100544>
- Ahmad, M., y Satrovic, E. (2023). How do transportation-based environmental taxation and globalization contribute to ecological sustainability? *Ecological Informatics*, 74, 102009. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2023.102009>
- Anthony, T., Shohan, A. A. A., Oludare, A., Alsulamy, S., Kafy, A. A., y Khedher, K. M. (2024). Spatial analysis of land cover changes for detecting environmental degradation and promoting sustainability. *Kuwait Journal of Science*, 51 (2), 100197. <https://doi.org/10.1016/j.kjs.2024.100197>
- Arfasa, G. F., Owusu-Sekyere, E. y Doke, D. A. (2024). Spatio-Temporal Analysis of Land Use/Land Cover Change and the Implications on Sustainable Development Goals in the Vea Catchment of Ghana. *Rangeland Ecology & Management*, 94, 83-94. <https://doi.org/10.1016/j.rama.2024.02.005>
- Arima, E. Y., Denvir, A., Young, K. R., González-Rodríguez, A. y García-Oliva, F. (2022). Modelling avocado-driven deforestation in Michoacán, Mexico. *Environmental Research Letters*, 17 (3), 034015. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac5419>
- Bajocco, S., Smiraglia, D., Scaglione, M., Raparelli, E. y Salvati, L. (2018). Exploring the role of land degradation on agricultural land use change dynamics. *Science of The Total Environment*, 636, 1373-1381. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.412>
- Belčáková, I., Olah, B., Slámová, M., y Pšenáková, Z. (2021). A Cultural and Environmental Assessment of a Landscape Archetype with Dispersed Settlements in Čadca Cadastral District, Slovakia. *Sustainability*, 13 (3). <https://doi.org/10.3390/su13031200>
- Belfiore, A. M., Mondanaro, A., Castiglione, S., Melchionna, M., Girardi, G., Raia, P. y Di Febbraro, M. (2024). Too much of a good thing? Supplementing current species observations with fossil data to assess climate change vulnerability via ecological niche models. *Biological Conservation*, 291, 110495. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2024.110495>
- Benítez, F. A. (2022). Análisis espaciotemporal del proceso de pérdida forestal en los municipios de Charo, Hidalgo, Indaparapeo, Queréndaro y Zinapécuaro. Michoacán, México. *Revista Cartográfica*, 106, 99-123. <https://doi.org/10.35424/rcarto.i106.3134>
- Berhanu, Y., Dalle, G., Sintayehu, D. W., Kelboro, G. y Nigussie, A. (2023). Land use/land cover change-induced greenhouse gas emissions in the global biosphere reserve of tropical Afromontane forest. *Scientific African*, 21, e01811. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e01811>

- Cabral, P., Campos, F. S., David, J. & Caser, U. (2021). Disentangling ecosystem services perception by stakeholders: An integrative assessment based on land cover. *Ecological Indicators*, 126, 107660. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107660>
- Camacho, D., Panizo-Lledot, Á., Bello-Orgaz, G., Gonzalez-Pardo, A. & Cambria, E. (2020). The four dimensions of social network analysis: An overview of research methods, applications, and software tools. *Information Fusion*, 63, 88-120. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2020.05.009>
- Camacho, S. R., Camacho-Sanabria, J. M., Balderas-Plata, M. Á. & Sánchez-López, M. (2017). Cambios de cobertura y uso de suelo: estudio de caso en Progreso Hidalgo, Estado de México. *Madera y Bosques*, 23 (3), 39-60. <https://doi.org/10.21829/myb.2017.2331516>
- Carpio, A., Ponce-Lopez, R. & Lozano-García, D. F. (2021). Urban form, land use, and cover change and their impact on carbon emissions in the Monterrey Metropolitan area, Mexico. *Urban Climate*, 39, 100947. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100947>
- Chaparro, T. A., Wang, J., Zhang, J., Liu, L., y Lan, Y. (2024). Temporal analysis of land degradation and urban expansion in central Yunnan Province using remote sensing for supporting sustainable development goals 11/15. *Ecological Indicators*, 163, 112058. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112058>
- Chebby, F., Mmbaga, N., y Ngongolo, K. (2023). Land use land cover change and socio-economic activities in the Burunge Wildlife Management Area ecosystem during COVID-19. *Heliyon*, 9, 2-17. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14064>
- CONAFOR (2020). Estimación de la tasa de deforestación bruta en México para el periodo 2001-2018 mediante el método de muestreo. (Documento Técnico. Recuperado de : <https://www.gob.mx/conafor/documentos/estimacion-de-la-tasa-dedeforestacion-bruta-en-mexico-para-el-periodo-2001-2018-mediante-el-metodo-demuestreo?idiom=es>
- Damtew, A., Teferi, E. & Ongoma, V. (2022). Farmers' perceptions and spatial statistical modeling of most systematic LULC transitions: Drivers and livelihood implications in Awash Basin, Ethiopia. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 25, 100661. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100661>
- Daniele, C., Tom, M., Stamm, C. & Odermatt, D. (2023). Pixel-based mapping of open field and protected agriculture using constrained Sentinel-2 data. *ISPRS Open Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 8, 100033. <https://doi.org/10.1016/j.ophoto.2023.100033>
- Dembélé, F., Guuroh, R. T., Ansah, P. B., Asare, D.-C. B. M., Da, S. S., Aryee, J. N. A. & Adu-Bredu, S. (2024). Land use land cover change and intensity analysis of land transformation in and around a moist semi-deciduous forest in Ghana. *Trees, Forests and People*, 15, 100507. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2024.100507>
- Denvir, A. (2023). Avocado expansion and the threat of forest loss in Michoacán, Mexico under climate change scenarios. *Applied Geography*, 151, 102-856. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2022.102856>
- Eshita, A. E., Marzen, L. J., Lamba, J., Ahsanullah, S. M., y Mitra, C. (2024). Projection of land use and land cover changes based on land change modeler and integrating both land use land cover and climate change on the hydrological response

- of Big Creek Lake Watershed, South Alabama. *Journal of Environmental Management*, 370, 122923. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122923>
- FAO (1996). Forest resources assessment 1990. *Survey of Tropical forest cover and study of change processes*. <https://www.fao.org/3/w0015e/w0015e00.htm>.
- FAO. (2020). *Evaluación de los recursos forestales mundiales Principales resultados*. <https://www.fao.org/3/ca8753es/ca8753es.pdf>
- Fikadu, G. y Olika, G. (2023). Impact of land use land cover change using remote sensing with integration of socio-economic data on Rural Livelihoods in the Nashe watershed, Ethiopia. *Heliyon*, 9 (3), 13-746. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13746>
- Geist, H. J., y Lambin, E. F. (2002). Proximate Causes and Underlying Driving Forces of Tropical Deforestation. *BioScience*, 52 (2), 143-150. <https://academic.oup.com/bioscience/article/52/2/143/341135>
- Gordillo, R. C., y Castillo, S. M. (2017). Cambio de uso del suelo en la cuenca del río Sabinal, Chiapas, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 4 (10), 39-49. <https://doi.org/10.19136/era.a4n10.803>
- Hasan, S. S., Alharbi, O. A., y Fahil, A. S. (2024). Land use and land cover mapping using Landsat-8 and Sentinel-2 data in Al Qunfudhah coast, western Saudi Arabia: A comparative study. *Regional Studies in Marine Science*, 71, 103429. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2024.103429>
- INEGI (2010). *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos Zinapécuaro, Michoacán de Ocampo. México. Clave geoestadística*. https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/16/16110.pdf
- INEGI (2011). *Guía para la interpretación de cartografía. Uso del suelo y vegetación, escala 1:250000 serie V*. https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825092030.pdf
- INEGI (2020). *Población rural y urbana*. https://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/rur_urb.aspx?tema=P
- Kamran, Khan, J. A., Khayyam, U., Waheed, A. & Khokhar, M. F. (2023). Exploring the nexus between land use land cover (LULC) changes and population growth in a planned city of islamabad and unplanned city of Rawalpindi, Pakistan. *Heliyon*, 9 (2), e13297. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13297>
- Kuma, H. G., Feyessa, F. F., y Demissie, T. A. (2022). Land-use/land-cover changes and implications in Southern Ethiopia: evidence from remote sensing and informants. *Heliyon*, 8, 2-11. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09071>
- Lee, R. H., Navarro-Navarro, L. A., Ley, A. L., Hartfield, K., Tolleson, D. R., y Scott, C. A. (2021). Spatio-temporal dynamics of climate change, land degradation, and water insecurity in an arid rangeland: The Río San Miguel watershed, Sonora, Mexico. *Journal of Arid Environments*, 193, 104539. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2021.104539>
- López, E., Bocco, G., Mendoza, M., Velázquez, A., y Rogelio Aguirre-Rivera, J. (2006). Peasant emigration and land-use change at the watershed level: A GIS-based approach in Central Mexico. *Agricultural Systems*, 90 (1), 62-78. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2005.11.001>
- Luan, G., Zhao, F., Xia, J., Huang, Z., Feng, S., Song, C., Zhou, X. (2024). Analysis of long-term spatio-temporal changes of plateau urban wetland reveals the response

- mechanisms of climate and human activities: A case study from Dianchi Lake Basin 1993-2020. *Science of The Total Environment*, 912, 169447.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169447>
- Maldonado, C. P. (2005). *Demografía / Demography: conceptos y técnicas fundamentales*, P. & Valdéz (eds.).
- Manley, E., Ogneva-Himmelberger, Y., Ruelle, M., Hanumantha, R., Mazari-Hiriart, M. & Downs, T. J. (2022). Land-cover change and urban growth in the Mexico-Lerma-Cutzamala Hydrological Region, 1993–2018. *Applied Geography*, 147, 102785.
<https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2022.102785>
- Marisa, M.-H., Adrián, F.-R., Jannice, A.-V., Misael Sebastián, G.-H. & Diego, D.-V. (2024). Water quality management in a tropical karstic system influenced by land use in Chiapas, Mexico. *Environmental Challenges*, 16, 100981.
<https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.100981>
- Mariye, M., Li, J. & Maryo, M. (2022). Land use and land cover change, and analysis of its drivers in Ojoje watershed, Southern Ethiopia. *Heliyon*, 8, 2-13.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09267>
- Mas, Díaz, G. J. & Pérez, V. (2003). Evaluación de la confiabilidad temática de mapas o de imágenes clasificadas: una revisión. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, (51), 53-72.
<https://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n51/n51a5.pdf>
- Mendoza, M., Bocco, G., López, G. E., y Bravo, M. (2002). Implicaciones hidrológicas del cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo: una propuesta de análisis espacial a nivel regional en la cuenca cerrada del lago de Cuitzeo, Michoacán. *Investigaciones geográficas*, (49), 92-117 Recuperado de: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-46112002000300007&script=sci_arttext
- Mengistu, A., y Woldetsedik, M. (2018). Proximate Causes and Underlying Driving Forces of Land Cover Change in Southest Ethiopia. *Journal of Sustainable Development in Africa*, 20 (1), 232-244. Recuperado de: <https://jsda-africa.com/JsdA/Vol20No1%20Spring%202018/2-%20EnvironmentalInfrastructureLand-Use/Proximate%20Causes.Underlying%20Driving%20Force.SW.Ethiopia%20Mengistu.pdf>
- Mięsiak, W. K. & Turczyński, M. (2024). Quality indexes of land ownership and land cover as indicators of small lake catchment degradation. *Ecological Indicators*, 166, 112482. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112482>
- Niu, H., Chen, S. & Xiao, D. (2024). Multi-Scenario land cover changes and carbon emissions prediction for peak carbon emissions in the Yellow River Basin, China. *Ecological Indicators*, 168, 112794. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112794>
- Ortiz, A., Adriana Ivón, Suárez, M. N., López, G., José Luis & Vilaboa, A., Julio (2023). Análisis de la agricultura protegida y sus impactos socioambientales en tres municipios de la Sierra Nevada de Puebla, México. *Revista Religación*, 8 (36), 1-14.
<https://doi.org/10.46652/rgn.v8i36.1061>
- Pérez, H. M. J., Hernández, A. H., Sánchez, J. R., González, G. C. & Madrigal, R. S. (2021). Dinámica de cambios de uso de suelo y vegetación por actividades antropogénicas en Zaachila, Oaxaca Dynamics of changes in land use and vegetation due to anthropogenic activities in Zaachila, Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 12 (66), 27-45. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i66.894>

- Pontius, R. G., Shusas, E. & McEachern, M. (2004). Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 101 (2), 251-268. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2003.09.008>
- Qasim, M., Hubacek, K. & Termansen, M. (2013). Underlying and proximate driving causes of land use change in district Swat, Pakistan. *Land Use Policy*, 34, 146-157. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2013.02.008>
- Rangel, P., Jesús Gabriel, Sanhouse-García, A. J., Flores-González, L. M., Monjardín-Armenta, S. A., Mora-Félix, Z. D., Rentería-Guevara, S. A. & Bustos-Terrones, Y. A. (2024). Effect of land use and land cover changes on land surface warming in an intensive agricultural region. *Journal of Environmental Management*, 371, 123249. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123249>
- Ren, J., Wang, W. J., Fei, L., Wang, L., Xing, S. & Cong, Y. (2024). Impacts of climate change and land Use/Cover change on ecological security networks in Changbai Mountains, Northeast China. *Ecological Indicators*, 169, 112849. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112849>
- Rodríguez, N., Vieyra, A., Méndez-Lemus, Y., Hidalgo Dattwyler, R., Alvarado Peterson, V. & Rodríguez, J. (2020). Trayectorias de la periurbanización en Morelia, México: segregación espacial desde un enfoque relacional. *Revista de Urbanismo*, (42), 88-104. <https://doi.org/10.5354/0717-5051.2020.54924>
- Roy, P. D., Natarajan, L. & Chokkalingam, L. (2024). Changes in Lu/Lc and vegetation around the Acapulco Bay at southwest Mexico from the hurricane Otis (October 25, 2023). *Journal of South American Earth Sciences*, 136, 104819. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2024.104819>
- Ruiz, L., Cinthia, Vieyra, A. & Méndez-Lemus, Y. (2021). Segregación espacial en Tarímbaro, municipio periurbano de la zona metropolitana de Morelia, Michoacán, México. *Revista de Geografía Norte Grande*, 78, 237-257. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022021000100237>
- Sandoval, S., Escobar-Flores, J. G. & Badar Munir, M. (2023). Urbanization and its impacts on land surface temperature and sea surface temperature in a tourist region in Mexico from 1990 to 2020. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 32, 101046. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.101046>
- SIAP (2020). *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola*. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- SIAP (2023). *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola*. Retrieved 7 de agosto from <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- Sun, S., Chen, B., Yan, J., Van Zwieten, L., Wang, H., Dong, J. & Song, Z. (2024). Potential impacts of land use and land cover change (LUCC) and climate change on evapotranspiration and gross primary productivity in the Haihe River Basin, China. *Journal of Cleaner Production*, 476, 143729. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143729>
- Temesgen, F., Warkineh, B. & Hailemichael, A. (2022). Seasonal land use/land cover change and the drivers in Kafta Sheraro national park, Tigray, Ethiopia. *Heliyon*, 8 (12), e12298. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12298>
- Tian, L. (2015). Land use dynamics driven by rural industrialization and land finance in the peri-urban areas of China: "The examples of Jiangyin and Shunde". *Land Use Policy*, 45, 117-127. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.01.006>
- Tilahun, Z. A., Bizuneh, Y. K. & Mekonnen, A. G. (2024). A spatio-temporal analysis of the magnitude and trend of land use/land cover changes in Gilgel Gibe Catchment,

Southwest Ethiopia. *Heliyon*, 10 (2), e24416. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24416>

Vela, P. A. A., Navarro Martínez, M. A., Mendoza Briseño, M. A., Sánchez Sánchez, J. A. & Esparza Olguín, L. G. (2024). Análisis multitemporal de cambios en el NDVI en una región con aprovechamiento forestal en la península de Yucatán, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 15 (81), 160-186.

<https://doi.org/10.29298/rmcf.v15i81.1425>

Zhan, Q., de Senerpont Domis, L. N., Lüring, M., Marcé, R., Heuts, T. S. & Teurlincx, S. (2023). Process-based modeling for ecosystem service provisioning: Non-linear responses to restoration efforts in a quarry lake under climate change. *Journal of Environmental Management*, 348, 119163.

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119163>