

Dynamics of land use change and land cover in a micro-watershed from the Pantepec river, Hidalgo, Mexico

Dinámica del cambio de uso de suelo y cobertura vegetal en una microcuenca del río Pantepec, Hidalgo, México

María G. Hinojosa-Pérez^{1*}; Otilio A. Acevedo-Sandoval¹; Gabriela M. Vázquez-Cuevas¹; Jessica Bravo-Cadena^{1,2}; Humberto I. Navarro-Gómez¹; Ramón Razo-Zárate³; Silvana B. Valencia-Pulido⁴

¹Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería. Carretera Pachuca-Tulancingo km 4.5, Col. Carboneras. C. P. 42184. Mineral de la Reforma, Hidalgo, México.

²Tecnológico Nacional de México-Instituto Tecnológico Superior del Oriente del Estado de Hidalgo. Carretera Apan-Tepeapulco, Las Peñitas, C. P. 43900. Apan, Hidalgo, México.

³Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Instituto de Ciencias Agropecuarias. Av. Universidad km 1, Exhacienda de Aquetzalpa. C. P. 43600. Tulancingo, Hidalgo, México.

⁴Fototeca Nacional INAH/Área de Conservación. Casasola s/n, Col. Centro. C. P. 42000. Pachuca de Soto, Hidalgo, México.

*Corresponding author: hi467879@uaeh.edu.mx; tel.: +52 771 1107570.

Abstract

Introduction. The analysis of land cover and land use change (LCLUC) allows the identification of factors that generate changes in ecosystems.

Objective. To analyze the dynamics of LCLUC in a micro-watershed of the Pantepec river in the Otomí-Tepehua region, Hidalgo, for the period 1993-2018.

Materials and methods. Using vector data from series II (1993), IV (2007), and VII (2018) from the Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) and an unsupervised classification in QGIS 2.18.10, seven categories of land use and land cover were identified. The MOLUSCE (Modules for Land Use Change Evaluation) tool in QGIS 2.18.10 was used to obtain change matrices and maps. Consequently, the rate of change, loss, gain, total and net change, and exchange between categories were calculated for three analysis periods.

Results and discussion. From 1993 to 2018 there was a process of loss and gain for cloud forest with a rate of change of -3.21 %, driven by induced grassland and rainfed agriculture with rates of change of 3.75 and -2.38 % respectively. Over 25 years, rainfed agriculture decreased by 57 % in area, while induced grassland expanded by 251 %.

Conclusions. Land use categories with significant changes are located around San Bartolo Tutotepec, influenced by anthropogenic activities. There are variations in the forest categories, attributed to changes in the INEGI classification methodology between series II, IV and VII.

Resumen

Introducción. El análisis del cambio de cobertura y uso del suelo (CCUS) permite la identificación de factores que generan cambios en los ecosistemas.

Objetivo. Analizar la dinámica del CCUS en una microcuenca del río Pantepec en la región Otomí-Tepehua, Hidalgo, durante el periodo 1993-2018.

Materiales y métodos. Con datos vectoriales de la serie II (1993), IV (2007) y VII (2018) del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y mediante una clasificación no supervisada en QGIS 2.18.10, se identificaron siete categorías de uso de suelo y cobertura vegetal. La herramienta MOLUSCE (Modules for Land Use Change Evaluation) de QGIS 2.18.10 se empleó para la obtención de matrices y mapas de cambio. Para tres periodos de análisis, se calcularon la tasa de cambio, pérdida, ganancia, cambio total y neto e intercambio entre categorías.

Resultados y discusión. Entre 1993 al 2018 existió un proceso de pérdida y ganancia en el bosque mesófilo de montaña con una tasa de cambio de -3.21 %, impulsado por el pastizal inducido y la agricultura de temporal con tasas de cambio de 3.75 y -2.38 % respectivamente. En 25 años, la agricultura de temporal perdió 57 % de superficie y el pastizal inducido aumentó 251 %.

Conclusiones. Las categorías de usos de suelo con cambios significativos se ubican en los alrededores de San Bartolo Tutotepec, influenciadas por actividades antrópicas. Existen variaciones en las categorías de bosque, atribuidas a cambios en la metodología de clasificación del INEGI entre las series II, IV y VII.

Keywords: rainfed agriculture; cloud forest; change matrix; change map; induced grassland.

Palabras clave: agricultura de temporal; bosque mesófilo; matriz de cambio; mapa de cambio; pastizal inducido.

Introduction

As the world's population increases, the pressure on natural resources grows. This implies an increase in deforestation, due to the opening of agricultural and urban areas (Chughtai et al., 2021); consequently, the intensive development of these activities has generated significant changes in land use (Leija-Loredo & Pavón, 2017). Land cover and land use change (LCLUC) have an impact on ecosystem fragmentation, extinction of local fauna and flora (Leija-Loredo & Pavón, 2017), food security, and soil and water degradation (Perović et al., 2018); therefore, understanding LCLUC dynamics allows for better planning, management, and conservation of ecosystems.

Geographic Information Systems (GIS) and Land Cover and Land Use Change (LCLUC) analysis techniques (Dixon & Uddameri, 2015) are valuable tools for detecting changes in land use. Land use maps, produced by the Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) and integrated into GIS, allow for spatial comparisons of land use categories over time, enabling empirical estimates of conditional change probabilities (Partida-Sedas et al., 2017). LCLUC analysis can help to identify key drivers of change and explores the processes behind them, this by calculating change matrices and maps from an initial year to a final year (Chughtai et al., 2021). Additionally, LCLUC analysis highlights areas suitable for conservation initiatives, restoration efforts, and the implementation of sustainable management policies (Toledo-Aceves et al., 2022), including the establishment of voluntarily protected areas for ecosystem conservation and sustainable use (Ochoa-Ochoa et al., 2021).

Due to the lack of application of LCLUC techniques in the Otomí-Tepehua region, this study aimed to analyze land-use change dynamics at a micro-watershed scale over a full period (1993-2018) and two subintervals (A: 1993-2007 and B: 2007-2018). The hypothesis is that forest loss is driven by the expansion of agricultural activities. Analyzing at the micro-watershed level allows for the identification of specific actions for the conservation and management of natural resources (Pande, 2020).

Materials and Methods

The study micro-watershed, covering an area of 151.60 km², is located between 20° 26' - 20° 18' N and 98° 07' - 98° 18' W (Figure 1), in the northeastern part of the state of Hidalgo, within the Otomí-Tepehua region. It is bounded by the municipalities of Tenango de Doria (48.78 %), San Bartolo Tutotepec (46.21 %), and Huehuetla (5.01 %). The micro-watershed is part of the Tuxpan river hydrological watershed (RH27D) and falls

Introducción

A medida que la población mundial aumenta, la presión por los recursos naturales crece. Esto implica incremento en la deforestación, debido a la apertura de zonas agropecuarias y urbanas (Chughtai et al., 2021); en consecuencia, el desarrollo intensivo de estas actividades genera cambios significativos en el uso del suelo (Leija-Loredo & Pavón, 2017). El cambio de cobertura y uso del suelo (CCUS) tiene impacto en la fragmentación de ecosistemas, la extinción de fauna y flora locales (Leija-Loredo & Pavón, 2017), la seguridad alimentaria y la degradación del suelo y agua (Perović et al., 2018); por tanto, la comprensión de la dinámica del CCUS permite una mejor planificación, gestión y conservación de los ecosistemas.

Entre las herramientas útiles para la identificación de cambios de uso de suelo se encuentran los sistemas de información geográfica (SIG) y técnicas de análisis de CCUS (Dixon & Uddameri, 2015). La cartografía de uso de suelo, emitida por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) e integrada en un SIG, posibilita la comparación espacial de categorías de uso de suelo en tiempos para la estimación empírica de las probabilidades condicionales de cambio (Partida-Sedas et al., 2017). El análisis del CCUS facilita la identificación de los principales motores de cambio e investiga los procesos que los han generado mediante el cálculo de la matriz y mapa de cambio de un año inicial a uno final (Chughtai et al., 2021). Además, el análisis de CCUS identifica regiones para el desarrollo potencial de iniciativas de conservación, restauración y aplicación de políticas de manejo sustentable (Toledo-Aceves et al., 2022), tales como la creación de áreas voluntariamente reservadas para la conservación y uso sustentable de los ecosistemas (Ochoa-Ochoa et al., 2021).

Debido a la falta de aplicación de técnicas de CCUS en la región Otomí-Tepehua, el objetivo del presente trabajo fue analizar la dinámica de cambio a escala de microcuenca en un periodo total (1993-2018) y dos subintervalos (A: 1993-2007 y B: 2007-2018). Se plantea como hipótesis que la pérdida del bosque es generada por el aumento de actividades agropecuarias. El análisis a nivel microcuenca permite la identificación de acciones específicas para la conservación y manejo de los recursos naturales (Pande, 2020).

Materiales y métodos

La microcuenca de estudio con área de 151.60 km² está ubicada entre 20° 26' - 20° 18' LN y 98° 07' - 98° 18' LO (Figura 1), al noreste del estado de Hidalgo en la región Otomí-Tepehua, delimitada por los municipios de Tenango de Doria (48.78 %), San Bartolo Tutotepec (46.21 %) y Huehuetla (5.01 %). La microcuenca forma



Figure 1. Micro-watershed of the Pantepec river, Hidalgo, Mexico. Compiled by the authors with data from INEGI (2021). CL: Contour lines.

Figura 1. Microcuenca del río Pantepec, Hidalgo, México. Elaboración propia con datos del INEGI (2021). CN: Curvas de nivel.

within the Pantepec river sub-watershed (RH27Dd) (INEGI, 2021). The study area was delineated using the Watershed Water Flow Simulator (SIATL in Spanish) version 2.0, which is based on INEGI's 1:50 000 scale hydrographic network (INEGI, 2021).

The micro-watershed is located at elevations of 600 to 2600 m with rainfall of 1200 to 2000 mm and temperatures of 12 to 18 °C. The predominant climates are cold C(E)(m), humid temperate C(m) and C(fm), and humid semihumid (A)C(fm) (INEGI, 2006, 2007). The topography corresponds to high mountains with steep slopes (99.97 %) located in the Sierra Madre Oriental (INEGI, 2001a). The predominant vegetation types are coniferous forest, cloud forest and evergreen rainforest that interact with agricultural, grassland and urban areas (INEGI, 2018).

Vector data for the LCLUC analysis were obtained from series II (1993), IV (2007) and VII (2018); the scale of all cartographic sources was 1:250 000 (INEGI, 2001b, 2009, 2018). Because series II and IV show no urban area, the

parte de la cuenca hidrológica del río Tuxpan (RH27D) y se ubica en la subcuenca del río Pantepec (RH27Dd) (INEGI, 2021). El área de estudio se determinó con el Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas (SIATL) edición 2.0 que se basa en la red hidrográfica a escala 1:50 000 del INEGI (2021).

La microcuenca se encuentra en elevaciones de 600 a 2600 m con precipitaciones de 1200 a 2000 mm y temperaturas de 12 a 18 °C. Predominan los climas frío C(E)(m), templado húmedo C(m) y C(fm) y semicálido húmedo (A)C(fm) (INEGI, 2006, 2007). La topografía corresponde a sierra alta escarpada (99.97 %) ubicada en la Sierra Madre Oriental (INEGI, 2001a). Los tipos de vegetación predominante son bosque de coníferas, bosque mesófilo de montaña y selva alta perennifolia que interactúan con zonas agrícolas, pastizales y urbanas (INEGI, 2018).

Los datos vectoriales para el análisis del CCUS se obtuvieron de la serie II (1993), IV (2007) y VII (2018); la escala de todas las fuentes cartográficas fue de

urban area was delimited with historical images from Google Earth Pro (<https://www.google.com/intl/es/earth/about/versions/>). In QGIS 2.18.10 (QGIS.org, 2019) an unsupervised classification was made to homologize the vegetation types of the three INEGI series, from which seven categories were obtained: cultivated grassland, rainfed agriculture, pine forest, cloud forest (CF), evergreen rainforest (ER), induced grassland and urban area (Figure 2). In series VII, the vegetation cover of pine-oak forest (PQF) was identified, which spatially corresponds to the same polygon labeled as coniferous forest in series IV, so it was considered within the pine forest category. This was done to avoid discrepancies between labels and to make a minimum adaptation to INEGI cartography for the unsupervised classification.

The vector data overlay was carried out with QGIS 2.18.10 (QGIS.org, 2019), where the change of polygon classification from CF series II to pine forest in series IV

1:250 000 (INEGI, 2001b, 2009, 2018). Debido a que las series II y IV no indican la zona urbana, esta se delimitó con imágenes históricas de Google Earth Pro (<https://www.google.com/intl/es/earth/about/versions/>). En QGIS 2.18.10 (QGIS.org, 2019) se hizo una clasificación no supervisada con fines de homologar los tipos de vegetación de las tres series de INEGI, a partir de la cual se obtuvieron siete categorías: pastizal cultivado, agricultura de temporal, bosque de pino, bosque mesófilo de montaña (BMM), selva alta perennifolia (SAP), pastizal inducido y zona urbana (Figura 2). En la serie VII se identificó la cobertura vegetal de bosque de pino-encino (BPQ) que espacialmente corresponde al mismo polígono etiquetado como bosque de coníferas en la serie IV, por lo cual se consideró dentro de la categoría de bosque de pino. Lo anterior se efectuó para evitar discrepancia entre etiquetas y realizar una adecuación mínima a la cartografía de INEGI para la clasificación no supervisada.

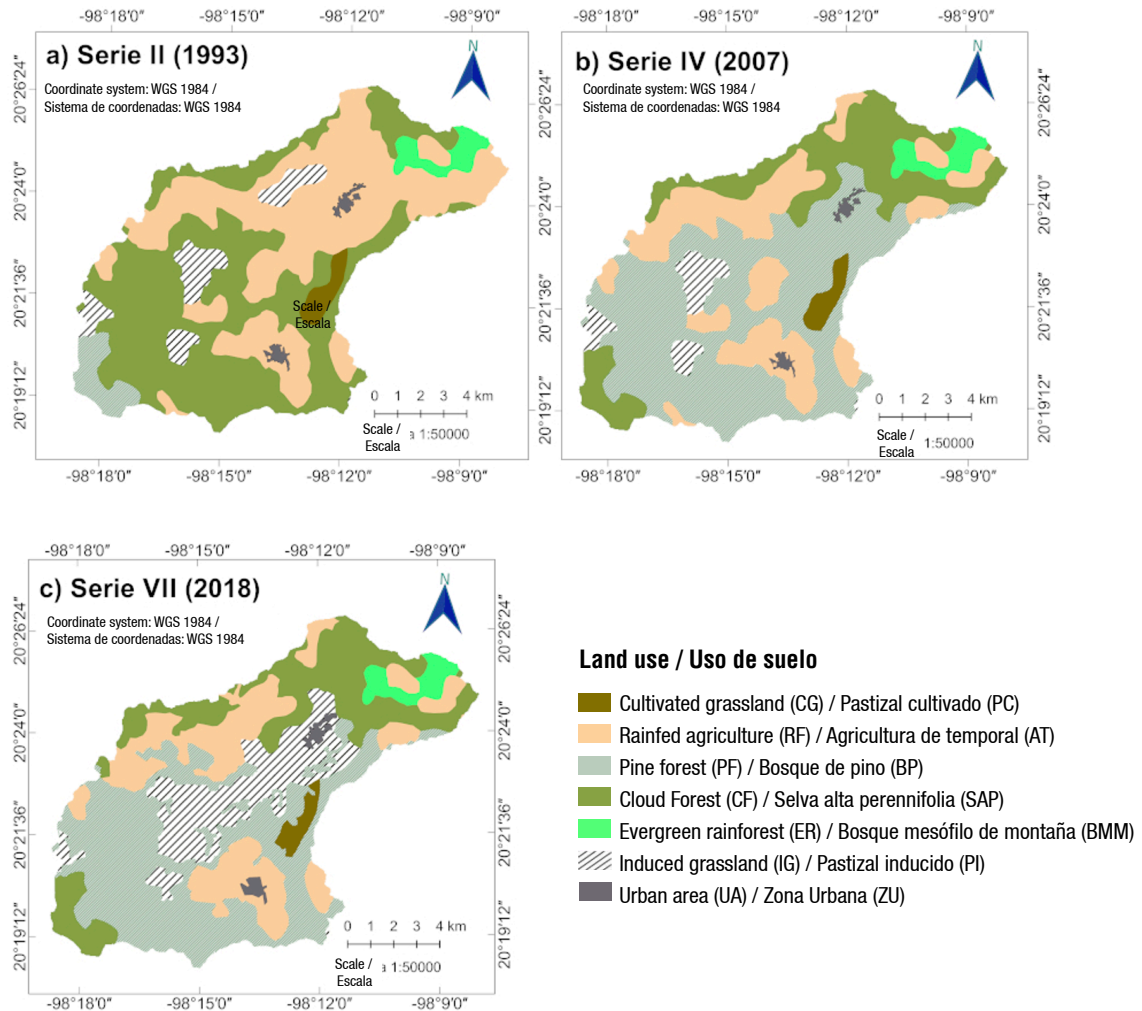


Figure 2. Land use classification in the Pantepec river micro-watershed, Hidalgo. Compiled by the author using data from INEGI (2001b, 2009, 2018).

Figura 2. Categorías de uso de suelo en la microcuenca del río Pantepec, Hidalgo. Elaboración propia con datos de INEGI (2001b, 2009, 2018).

was highlighted (Figure 2). To eliminate the possibility that these changes were driven by conversion to forestry production, data from the statistical and geographic yearbook of Hidalgo (INEGI, 2017) and the 2011 reforestation records from the Comisión Nacional Forestal (CONAFOR, 2011) were analyzed.

Acquisition of maps in Raster Format and execution of MOLUSCE

In QGIS 2.18.10, the land cover and land use maps from INEGI (shapefiles) were categorized and projected to the geographic coordinate system WGS84 UTM zone 14N. Subsequently, they were converted to raster format with a spatial resolution of 30 m. Due to the pixel size of the raster map, a difference of 0.05 % in the total area of rainfed agriculture and CF was identified in subintervals A and B (year 2007), and a difference of 0.07 % for pine forest. In the total interval compared to subinterval B, there were differences of 0.05 % and 0.12 % for pine forest and CF, respectively.

In the LCLUC analysis, MOLUSCE (Modules for Land Use Change Evaluation) from QGIS 2.18.10 was used, a tool that calculates the area and percentage of changes while identifying their locations. Using the cross-tabulation module, MOLUSCE estimates transition statistics by quantifying how many pixels changed from an initial year to a final year. The algorithmic area analysis module then computes the change map in raster format for each period, assigning an integer value to each pixel that indicates its transition (Asia Air Survey & NextGIS, 2013; GISLAB, 2014).

Dynamics of Land Cover and Land Use Change

MOLUSCE facilitated the calculation of the change matrix using the general matrix (Table 1), where each notation P_{ij} represents the proportion of the area transitioning from category i to category j and the diagonal shows the persistence of the categories j (P_{jj}). The total of the columns P_{i+} provides the proportion or total area of category i in year one (the sum of the values j of P_{ij}), while the total of the rows P_{+j} , represents the sum of all i of P_{ij} for year two (Gutiérrez et al., 2016; Pontius et al., 2004).

The exchange (Int) between categories, gain (G_j), loss (L_i), total change (C_t) and net change (C_n) were calculated using the following equations:

$$\begin{aligned} Int &= 2 \times \min (P_{i+} - P_{jj}, P_{+j} - P_{jj}) \\ G_j &= (P_{+j}) - (P_{jj}) \\ L_i &= (P_{i+}) - (P_{jj}) \\ C_t &= G_j + L_i \\ C_n &= C_n + Int; C_n = C_t - Int \end{aligned}$$

La sobreposición de los datos vectoriales se hizo con QGIS 2.18.10 (QGIS.org, 2019), donde resaltó el cambio de clasificación de polígonos de la serie II de BMM a bosque de pino en la serie IV (Figura 2). Para descartar que estos cambios ocurrieron por la conversión a producción forestal, se evaluaron las cifras registradas por el anuario estadístico y geográfico de Hidalgo (INEGI, 2017) y los registros de reforestación para 2011 de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR, 2011).

Obtención de mapas en formato ráster y ejecución de MOLUSCE

En QGIS 2.18.10, los mapas de cobertura y uso de suelo del INEGI (shapefiles) se categorizaron y proyectaron al sistema de coordenadas geográficas WGS84 UTM zona 14N; posteriormente, se convirtieron a formato ráster con resolución espacial de 30 m. Debido al tamaño de píxel del mapa en formato ráster, se identificó en el subintervalo A y B (año 2007) una diferencia de 0.05 % en la superficie total de la agricultura de temporal y BMM, y 0.07 % para el bosque de pino. En el intervalo total con referencia al subintervalo B hubo diferencias de 0.05 % y 0.12 % para bosque de pino y BMM, respectivamente.

En el análisis del CCUS se utilizó MOLUSCE (Modules for Land Use Change Evaluation) de QGIS 2.18.10, herramienta que calcula la superficie y porcentaje de cambios e identifica la ubicación de estos. Mediante el módulo de tabulación cruzada, MOLUSCE estima la estadística de transición al cuantificar cuantos píxeles cambiaron de un año inicial a uno final y con el módulo algorítmico de análisis de área calcula el mapa de cambio en formato ráster para cada periodo, donde a cada píxel le asignó un valor entero que indica su transición (Asia Air Survey & NextGIS, 2013; GISLAB, 2014).

Dinámica del cambio de cobertura y uso del suelo

MOLUSCE permitió el cálculo de la matriz de cambio a través de la matriz general (Cuadro 1), donde cada notación P_{ij} indica la proporción de la superficie con transición de la categoría i a la categoría j y en la diagonal muestra la persistencia de las categorías j (P_{jj}). En el total de las columnas P_{i+} se obtiene la proporción o área total de la categoría i en el año uno (suma de los valores j de P_{ij}), y en el total de las filas P_{+j} , la suma de todas las i de P_{ij} para el año dos (Gutiérrez et al., 2016; Pontius et al., 2004).

El intercambio (Int) entre categorías, la ganancia (G_j), pérdida (L_i), cambio total (C_t) y cambio neto (C_n) se calculó con las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} Int &= 2 \times \min (P_{i+} - P_{jj}, P_{+j} - P_{jj}) \\ G_j &= (P_{+j}) - (P_{jj}) \\ L_i &= (P_{i+}) - (P_{jj}) \end{aligned}$$

Table 1. General matrix for analyzing the dynamics of land cover and land use change, adapted from Pontius et al. (2004).
Cuadro 1. Matriz general de análisis de la dinámica de cambio de cobertura y uso del suelo, adaptada de Pontius et al. (2004).

		Year 2 / Año 2				Total 1
		Cat ₁	Cat ₂	Cat ₃	Cat ₄	
Year 1 / Año 1	Cat ₁	P ₁₁	P ₁₂	P ₁₃	P _{1j}	P ₁₊
	Cat ₂	P ₂₁	P ₂₂	P ₂₃	P _{2j}	P ₂₊
	Cat ₃	P ₃₁	P ₃₂	P ₃₃	P _{3j}	P ₃₊
	Cat ₄	P ₄₁	P ₄₂	P ₄₃	P _{4j}	P ₄₊
Total 2		P ₊₁	P ₊₂	P ₊₃	P _{+j}	1

P_{ij} = total area of category j in year two; P_{jj} = persistence; P_{i+} = Total area of category i for year one.

P_{ij} = área total de la categoría j en el año dos; P_{jj} = persistencia; P_{i+} = área total de la categoría i en el año uno.

Rate of change estimation

For each analysis interval, the rate of change was calculated using the equation defined by the FAO (Food and Agriculture Organization, 1996):

$$r_{t_1-t_2} = \left[\left(\frac{Fc_2}{Fc_1} \right)^{1/t} - 1 \right] * 100$$

where,

$r_{t_1-t_2}$ = rate of change over a specified period (%), where a negative value indicates a decrease and a value greater than zero indicates an increase in category
 Fc = area (ha) for the initial year (Fc_1) and final year (Fc_2)
 t = duration of the period under evaluation.

Results

General behavior of land use in the micro-watershed

The micro-watershed is dominated by cloud forest, rainfed agriculture and pine forest (Table 2). The presence of the seven vegetation type categories has been dynamic in each period: in 1993, the CF represented 45.79 %; in 2007, 19.79 %; and in 2018, 20.24 %. Rainfed agriculture has been another of the land covers dominating the landscape with 39.34 % in 1993, and 23.58 and 21.55 % in the last two years of analysis. The vegetation covers that increased in area from 1993 to 2018 were induced grassland from 6.04 % to 15.17 %, and pine forest from 3.39 % to 37.60 %. Moreover, cultivated grassland, ER and urban area showed no significant changes (Table 2).

Dynamics of land cover and land use change

The dynamics of change from 1993 to 2018 were evaluated with a general matrix shown in Table 3. The highest rate of change corresponded to pine forest with 10.10 %, starting in 1993 with 513.81 ha and ending with 5700.24 ha; the highest contribution in

$$C_t = G_j + L_i$$

$$C_t = C_n + Int; C_n = C_t - Int$$

Estimación de la tasa de cambio

Para cada intervalo de análisis se calculó la tasa de cambio con la ecuación definida por la FAO (Food and Agriculture Organization, 1996):

$$r_{t_1-t_2} = \left[\left(\frac{Fc_2}{Fc_1} \right)^{1/t} - 1 \right] * 100$$

donde,

$r_{t_1-t_2}$ = tasa de cambio en un periodo determinado (%), valor negativo indica disminución y valor mayor de cero indica aumento de categoría
 Fc = superficie (ha) para el año inicial (Fc_1) y final (Fc_2)
 t = duración del periodo evaluado.

Resultados

Comportamiento general del uso de suelo en la microcuenca

La microcuenca está dominada por BMM, agricultura de temporal y bosque de pino (Cuadro 2). La presencia de las siete categorías de tipos de vegetación ha sido dinámica en cada periodo: para 1993, el BMM representaba 45.79 %; en el 2007, 19.79 %; y en el 2018, 20.24 %. La agricultura de temporal ha sido otra de las coberturas que ha dominado el paisaje con 39.34 % en 1993 y 23.58 y 21.55 % en los dos últimos años de análisis. Las coberturas vegetales que aumentaron de superficie del año 1993 al 2018 fueron el pastizal inducido de 6.04 % a 15.17 % y bosque de pino de 3.39 % a 37.60 %; el pastizal cultivado, SAP y la zona urbana no presentaron cambios significativos (Cuadro 2).

Dinámica del cambio de cobertura y uso del suelo

La dinámica de cambio de 1993 a 2018 se evaluó con una matriz general presentada en el Cuadro 3. La tasa

Table 2. Land use and land cover per category (1993-2018) in a micro-watershed of the Pantepec river, Hidalgo, Mexico.
Cuadro 2. Uso de suelo y cobertura vegetal por categoría (1993-2018) en una microcuenca del río Pantepec, Hidalgo, México.

Category/Categoría	1993		2007		2018	
	ha	%	ha	%	ha	%
Cultivated grassland/ Pastizal cultivado	272.88	1.80	272.61	1.80	235.89	1.56
Rainfed agriculture/ Agricultura de temporal	5964.75	39.34	3575.34	23.58	3267.09	21.55
Pine forest/ Bosque de pino	513.81	3.39	7098.39	46.83	5706.81	37.60
Cloud forest/ Bosque mesófilo de montaña	6941.43	45.79	3000.6	19.79	3069.72	20.24
Evergreen rainforest/ Selva alta perennifolia	427.68	2.82	429.66	2.83	429.66	2.83
Induced grassland/ Pastizal inducido	916.20	6.04	660.15	4.35	2300.49	15.17
Urban area/ Zona urbana	123.75	0.82	123.75	0.82	158.85	1.05

Table 3. Matrix of change per category (1993-2018) in a micro-watershed of the Pantepec river, Hidalgo, Mexico.
Cuadro 3. Matriz de cambio por categoría (1993-2018) en una microcuenca del río Pantepec, Hidalgo, México.

Category/ Categoría	2018								Total 1 (ha)	Rate of change (%)/ Tasa de cambio (%)
	CG/PC	RA/AT	PF/BP	CF/BMM	ER/SAP	IG/PI	UA/ZU			
1993	CG/PC	228.87	0.00	44.01	0.00	0.00	0.00	0.00	272.88	-0.58
	RA/AT	0.90	2565.45	422.28	1561.23	6.21	1371.78	36.90	5964.75	-2.38
	PF/BP	0.00	0.00	11.61	502.20	0.00	0.00	0.00	513.81	10.10
	CF/BMM	6.12	438.39	5029.56	995.67	6.39	465.30	0.00	6941.43	-3.21
	ER/SAP	0.00	7.83	0.00	2.79	417.06	0.00	0.00	427.68	0.02
	IG/PI	0.00	255.42	192.78	6.39	0.00	461.61	0.00	916.20	3.75
	UA/ZU	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.80	121.95	123.75	1.00
Total 2 (ha)		235.89	3267.09	5700.24	3068.28	429.66	2300.49	158.85	15160.50	

Cultivated grassland (CG), rainfed agriculture (RA), pine forest (PF), cloud forest (CF), evergreen rainforest (ER), induced grassland (IG) and urban area (UA).

Pastizal cultivado (PC), agricultura de temporal (AT), bosque de pino (BP), bosque mesófilo de montaña (BMM), selva alta perennifolia (SAP), pastizal inducido (PI) y zona urbana (ZU).

this change was identified from CF with 5029.56 ha. The following change rates present values of 3.75 % for induced grassland, going from 916.20 to 2300.49 ha; where the main contributions were rainfed agriculture (1371.78 ha) and CF (465.30 ha). The other outstanding value corresponds to a loss rate of -3.21 % for CF, which started in 1993 with 6941.43 ha and ended with 3068.28 ha. The vegetation covers cultivated grassland, ER, and the urban area are the ones with the lowest rates of change, both positive and negative (Table 3).

más alta de cambio correspondió al bosque de pino con 10.10 %, iniciando en 1993 con 513.81 ha y terminando con 5700.24 ha; la mayor contribución en este cambio se identificó a partir del BMM con 5029.56 ha. Las siguientes tasas de cambio a destacar tienen valores de 3.75 % para pastizal inducido, pasando de 916.20 a 2300.49 ha; las principales contribuciones fueron de la agricultura de temporal (1371.78 ha) y BMM (465.30 ha). El otro valor destacado corresponde a una tasa de pérdida de -3.21 % para BMM, que inició en 1993 con

Table 4 indicates that, over a span of 25 years, the categories with more loss than gain were cultivated grassland, rainfed agriculture, and cloud forest. The largest total change of 8018.37 ha corresponded to CF with a loss (85.70 %) greater than the gain (29.90 %) (Figure 3a). Conversely, the vegetation types with more gain than loss were pine forest and induced grassland, where total change was mostly defined by the gains (5688.63 ha and 1838.88 ha, respectively). From 1993 to 2018, the area of induced grassland increased by 1384.29 ha with an exchange of 909.18 ha, which was lower than the gains (1838.88 ha). The vegetation types with the smallest losses were ER (2.48 %), with an exchange greater than both losses and gains, and the urban zone (1.50 %), which had a net change similar to the gains (Figure 3a).

According to Table 5, in subinterval A (1993 to 2007), the vegetation types with the highest negative rate of

6941.43 ha y terminó con 3068.28 ha. Las coberturas vegetales de pastizal cultivado, SAP y la zona urbana son las que presentaron tasas de cambio menores, tanto positivas como negativas (Cuadro 3).

El Cuadro 4 indica que, en 25 años, las categorías con mayor pérdida que ganancia fueron el pastizal cultivado, agricultura de temporal y BMM. El mayor cambio total de 8018.37 ha correspondió al BMM, con pérdida (85.70 %) mayor que la ganancia (29.90 %) (Figura 3a). De forma contraria, los tipos de vegetación con mayor ganancia que pérdida fueron el bosque de pino y pastizal inducido, donde el cambio total está definido en su mayoría por las ganancias (5688.63 ha y 1838.88 ha, respectivamente). Del año 1993 a 2018, la superficie del pastizal inducido aumentó 1384.29 ha con un intercambio de 909.18 ha menor que las ganancias (1838.88 ha). Los tipos de vegetación con menor pérdida fueron la SAP (2.48 %) con un



Figure 3. Dynamics of land use category changes in a micro-watershed of the Pantepec river, Hidalgo, Mexico.

Figura 3. Dinámica de cambios de categorías de usos de suelo en una microcuenca del río Pantepec, Hidalgo, México.

Table 4. Dynamics of changes (1993-2018) of land use categories in a micro-watershed of the Pantepec river, Hidalgo, México.**Cuadro 4. Dinámica de cambios (1993-2018) de categorías de usos de suelo en una microcuenca del río Pantepec, Hidalgo, México.**

Category/ Categoría	Loss (ha)/ Pérdida (ha)	Gain (ha)/ Ganancia (ha)	Net change (ha)/ Cambio neto (ha)	Exchange (ha)/ Intercambio (ha)	Total change/ Cambio total (ha)	Rate of change (%)/ Tasa de cambio (%)
Cultivated grassland/ Pastizal cultivado	44.01	7.02	36.99	14.04	51.03	-0.58
Rainfed agriculture/ Agricultura de temporal	3 399.30	701.64	2 697.66	1 403.28	4 100.94	-2.38
Pine forest/ Bosque de pino	502.20	5 688.63	5 186.43	1 004.40	6 190.83	10.10
Cloud forest/ Bosque mesófilo de montaña	5 945.76	2 072.61	3 873.15	4 145.22	8 018.37	-3.21
Evergreen rainforest/ Selva alta perennifolia	10.62	12.60	1.98	21.24	23.22	0.02
Induced grassland/ Pastizal inducido	454.59	1 838.88	1 384.29	909.18	2 293.47	3.75
Urban area/ Zona urbana	1.80	36.90	35.10	3.60	38.70	1.00

Table 5. Dynamics of changes (1993-2007) of land use categories in a micro-watershed of the Pantepec river, Hidalgo, Mexico.**Cuadro 5. Dinámica de cambios (1993-2007) de categorías de usos de suelo en una microcuenca del río Pantepec, Hidalgo, México.**

Category/ Categoría	Loss (ha)/ Pérdida (ha)	Gain (ha)/ Ganancia (ha)	Net change (ha)/ Cambio neto (ha)	Exchange (ha)/ Intercambio (ha)	Total change/ Cambio total (ha)	Rate of change (%)/ Tasa de cambio (%)
Cultivated grassland/ Pastizal cultivado	10.80	10.53	0.27	21.06	21.33	-0.01
Rainfed agriculture/ Agricultura de temporal	2 723.76	334.35	2 389.41	668.70	3 058.11	-3.59
Pine forest/ Bosque de pino	502.38	7 086.96	6 584.58	1 004.76	7 589.34	20.63
Cloud forest/ Bosque mesófilo de montaña	5 896.98	1 956.15	3 940.83	3 912.30	7 853.13	-5.81
Evergreen rainforest/ Selva alta perennifolia	10.62	12.60	1.98	21.24	23.22	0.03
Induced grassland/ Pastizal inducido	281.52	25.47	256.05	50.94	306.99	-2.31
Urban area/ Zona urbana	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

change were CF (-5.81 %), rainfed agriculture (-3.59 %), and induced grassland (-2.31 %), indicating considerably higher losses than gains; in contrast, pine forest had higher gains (1379.30 %) than losses (97.80 %). On the other hand, the loss and gain areas of cultivated pasture, ER, and urban area were similar and had rates of change either of zero or very close to this value (Figure 3b).

Finally, Table 6 indicates that induced grassland was the category with the highest gain (278.10 %) and positive

intercambio mayor que las pérdidas y ganancias y la zona urbana (1.50 %) con un cambio neto similar a las ganancias (Figura 3a).

Acorde con el Cuadro 5, en el subintervalo A (1993 al 2007), los tipos de vegetación con la mayor tasa de cambio negativa fueron el BMM (-5.81 %), agricultura de temporal (-3.59 %) y pastizal inducido (-2.31 %), lo que indica pérdidas considerablemente mayores que las ganancias; en contraste, el bosque de pino presentó mayores ganancias (1 379.30 %) que pérdidas (97.80 %).

Table 6. Dynamics of changes (2007-2018) of land use categories in a micro-watershed of the Pantepec river, Hidalgo, Mexico.
Cuadro 6. Dinámica de cambios (2007-2018) de categorías de usos de suelo en una microcuenca del río Pantepec, Hidalgo, México.

Category / Categoría	Loss (ha) / Pérdida (ha)	Gain (ha) / Ganancia (ha)	Net change (ha) / Cambio neto (ha)	Exchange (ha) / Intercambio (ha)	Total change / Cambio total (ha)	Rate of change (%) / Tasa de cambio (%)
Cultivated grassland / Pastizal cultivado	36.72	0.00	36.72	0.00	36.72	-1.31
Rainfed agriculture / Agricultura de temporal	707.22	397.44	309.78	794.88	1104.66	-0.82
Pine forest / Bosque de pino	1844.10	447.48	1396.62	894.96	2291.58	-1.97
Cloud forest / Bosque mesófilo de montaña	53.64	121.32	67.68	107.28	174.96	0.20
Evergreen rainforest / Selva alta perennifolia	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Induced grassland / Pastizal inducido	195.57	1835.91	1640.34	391.14	2031.48	12.02
Urban area / Zona urbana	1.80	36.90	35.10	3.60	38.70	2.30

rate of change (12.02 %) from 2007 to 2018. The gains of 1835.91 ha and losses of 195.57 ha represent for this category a total change of 2031.48 ha (Figure 3c). The vegetation types with a greater loss than gain were pine forest, cultivated grassland and rainfed agriculture with negative rates of change (-1.97, -1.31 and -0.82 % respectively). Similarly, the categories with greater gain than loss were induced grassland (12.02 %), urban area (2.30 %) and CF (0.20 %). In this period, the ER showed no changes in cover area (Figure 3c).

Land use change and vegetation cover maps

The spatial distribution of LCLUC represented in Figure 4 facilitated to identify that, from 1993 to 2018, rainfed agriculture and CF had important transitions with induced grassland in the middle part of the micro-watershed; other relevant transitions were those of pine forest and CF to the south of the area. In the total interval, induced grassland, rainfed agriculture, cloud forest and pine forest had the lowest persistence values: 50.40 %, 43.01 %, 14.30 % and 2.30 %, respectively. Among these categories, rainfed agriculture, CF, and induced pastureland experienced the highest number of transitions. The CF area primarily interacts with pine forest, induced grassland, and rainfed agriculture.

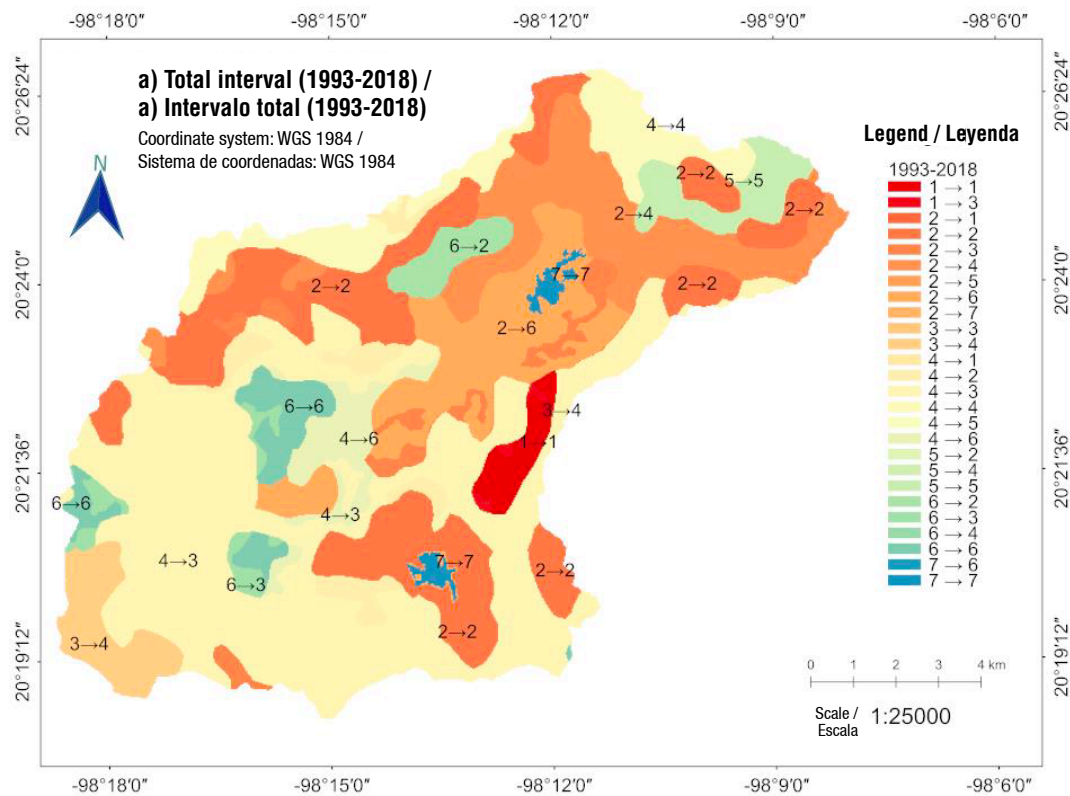
In subinterval A there were transitions from CF and rainfed agriculture with pine forest from the south to the middle part of the micro-watershed. These categories together with induced grassland had the highest dynamism, as well as the lowest percentage value of persistence (pine forest 2.22 %, CF 15 %, rainfed agriculture 54.34 % and induced grassland

Por otra parte, las superficies de pérdida y ganancia del pastizal cultivado, SAP y la zona urbana fueron similares y presentaron tasas de cambio de cero o muy cercanas a este valor (Figura 3b).

Finalmente, el Cuadro 6 indica que el pastizal inducido fue la categoría con la mayor ganancia (278.10 %) y tasa de cambio positiva (12.02 %) del año 2007 a 2018. Las ganancias de 1835.91 ha y las pérdidas de 195.57 ha representan para esta categoría un cambio total de 2031.48 ha (Figura 3c). Los tipos de vegetación con mayor pérdida que ganancia fueron el bosque de pino, pastizal cultivado y agricultura de temporal con tasas de cambio negativas (-1.97, -1.31 y -0.82 % respectivamente). De igual manera, las categorías con mayor ganancia que pérdida fueron el pastizal inducido (12.02 %), zona urbana (2.30 %) y BMM (0.20 %). En este periodo, la SAP no presentó cambios en la superficie (Figura 3c).

Mapas de cambio del uso de suelo y cobertura vegetal

La distribución espacial del CCUS representada en la Figura 4 permitió identificar que, de 1993 a 2018, la agricultura de temporal y BMM presentaron transiciones importantes con el pastizal inducido en la parte media de la microcuenca; otras transiciones relevantes fueron las del bosque de pino y BMM al sur. En el intervalo total, el pastizal inducido, agricultura de temporal, BMM y bosque de pino presentaron los valores más bajos de persistencia: 50.40 %, 43.01 %, 14.30 % y 2.30 %, respectivamente. De estas categorías, las que mostraron el mayor número de transiciones



Percentage value of persistence and transitions / Valor porcentual de persistencia y transiciones

Category / Categoría	1	2	3	4	5	6	7
1	83.90	-	16.10	-	-	-	-
2	0.02	43.01	7.08	26.17	0.10	23.00	0.62
3	-	-	2.30	97.70	-	-	-
4	0.10	6.30	72.50	14.30	0.10	6.70	-
5	-	1.80	-	0.70	97.50	-	-
6	-	27.90	21.00	0.70	-	50.40	-
7	-	-	-	-	-	1.50	98.50

Figure 4. Map of change and percentage value of persistence and transitions for the period (1993-2018) in a micro-watershed of the Pantepec river, Hidalgo, Mexico. Categories: 1. Cultivated grassland, 2. Rainfed agriculture, 3. Pine forest, 4. Cloud forest, 5. Evergreen rainforest, 6. Induced grassland and 7. Urban area.

Figura 4. Mapa de cambio y valor porcentual de persistencia y transiciones para el periodo (1993-2018) en una microcuenca del río Pantepec, Hidalgo, México. Categorías: 1. Pastizal cultivado, 2. Agricultura de temporal, 3. Bosque de pino, 4. Bosque mesófilo de montaña, 5. Selva alta perennifolia, 6. Pastizal inducido y 7. Zona urbana.

69.27 %) (Figure 5). For subinterval B, the conversion of vegetation cover from pine forest and rainfed agriculture to induced grassland was observed in the middle part of the micro-watershed; therefore, the percentage values of persistence with the same land use lower than 80 % were observed in pine forest and induced grassland (Figure 6).

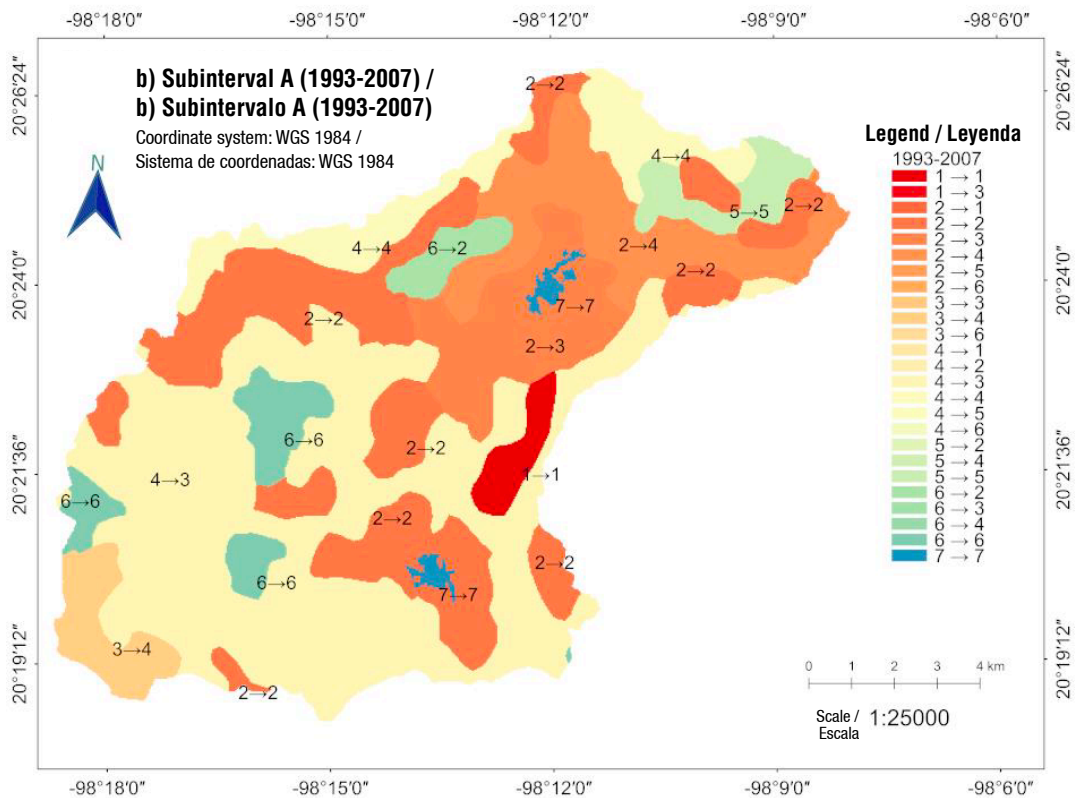
Discussion

General land use behavior in the micro-watershed

The analysis of LCLUC indicates that, in the 25 years of analysis, the areas of CF and pine forest were affected by rainfed agriculture and induced grassland.

fueron la agricultura de temporal, BMM y pastizal inducido. Se observó que la superficie del BMM tiene interacción principalmente con el bosque de pino, pastizal inducido y agricultura de temporal.

En el subintervalo A hubo transiciones del BMM y agricultura de temporal con el bosque de pino desde el sur hasta la parte media de la microcuenca. Estas categorías junto con el pastizal inducido tuvieron mayor dinamismo, así como el menor valor porcentual de persistencia (bosque de pino 2.22 %, BMM 15 %, agricultura de temporal 54.34 % y pastizal inducido 69.27 %) (Figura 5). Para el subintervalo B se observó la conversión de la cobertura vegetal de bosque de pino y agricultura de temporal a pastizal inducido en



**Percentage value of persistence and transitions /
Valor porcentual de persistencia y transiciones**

Category / Categoría	1	2	3	4	5	6	7
1	96.00	-	4.00	-	-	-	-
2	0.02	54.34	21.32	24.22	0.10	-	-
3	-	-	2.22	97.74	-	0.04	-
4	0.14	1.01	83.35	15.00	0.10	0.40	-
5	-	1.80	-	0.70	97.50	-	-
6	-	27.96	2.06	0.71	-	69.27	-
7	-	-	-	-	-	-	100.00

Figure 5. Map of change and percentage value of persistence and transitions for the period 1993-2007 in a micro-watershed of the Pantepec river, Hidalgo, Mexico. Categories: 1. Cultivated grassland, 2. Rainfed agriculture, 3. Pine forest, 4. Cloud forest, 5. Evergreen rainforest, 6. Induced grassland and 7. Urban area.

Figura 5. Mapa de cambio y valor porcentual de persistencia y transiciones para el periodo 1993-2007 en una microcuenca del río Pantepec, Hidalgo, México. Categorías: 1. Pastizal cultivado, 2. Agricultura de temporal, 3. Bosque de pino, 4. Bosque mesófilo de montaña, 5. Selva alta perennifolia, 6. Pastizal inducido y 7. Zona urbana.

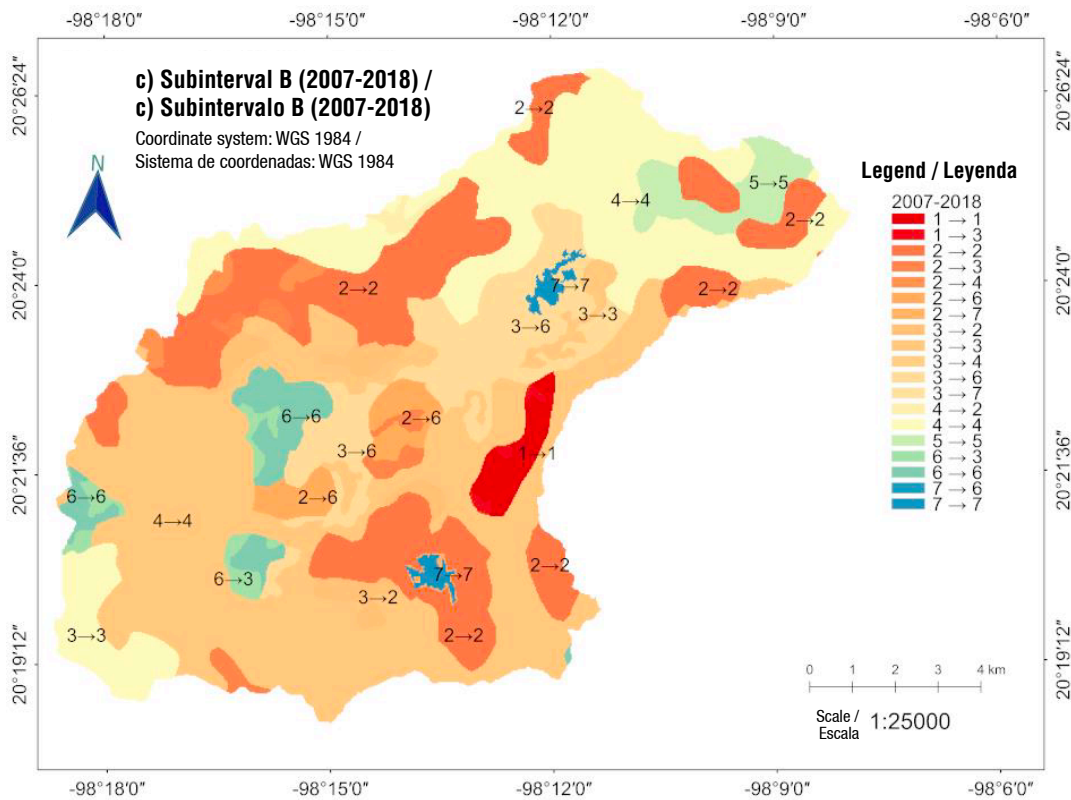
The decrease in rainfed agriculture and increase in induced grassland in the middle micro-watershed after 2007 (Figure 6) might have been driven by the opening of areas for grazing, responding to the need for forage in livestock production. Only for San Bartolo Tutotepec, beef production increased by 96.12 % from 2003 to 2014 (INEGI, 2004, 2017). Additionally, the reduction of natural cover in this municipality was identified by Leija et al. (2021), who reported that forage production was the main cause of a 36.40 % loss of forest cover over 29 years in a polygon of 8 052.00 ha. This confirms the effects on forests due to conversion to forage production, even though the micro-watershed only covers 46.21 % of the municipality of San Bartolo Tutotepec, highlighting the change in land use from

la parte media de la microcuenca; por ello, los valores porcentuales de persistencia con el mismo uso de suelo menores de 80 % se observaron en el bosque de pino y pastizal inducido (Figura 6).

Discusión

Comportamiento general del uso de suelo en la microcuenca

El análisis del CCUS indica que, en los 25 años de análisis, las superficies del BMM y bosque de pino fueron afectadas por la agricultura de temporal y el pastizal inducido. La disminución de la superficie de la agricultura de temporal y el aumento del pastizal



**Percentage value of persistence and transitions /
Valor porcentual de persistencia y transiciones**

Category / Categoría	1	2	3	4	5	6	7
1	86.50	-	13.50	-	-	-	-
2	-	80.20	6.00	3.40	-	9.80	0.60
3	-	4.84	74.04	-	-	20.88	0.24
4	-	1.79	-	98.21	-	-	-
5	-	-	-	-	100.00	-	-
6	-	-	29.63	-	-	70.37	-
7	-	-	-	-	-	1.45	98.55

Figure 6. Map of change and percentage value of persistence and transitions for the period 2007-2018 in a micro-watershed of the Pantepec river, Hidalgo, Mexico. Categories: 1. Cultivated grassland, 2. Rainfed agriculture, 3. Pine forest, 4. Cloud forest, 5. Evergreen rainforest, 6. Induced grassland and 7. Urban area.

Figura 6. Mapa de cambio y valor porcentual de persistencia y transiciones para el periodo 2007-2018 en una microcuenca del río Pantepec, Hidalgo, México. Categorías: 1. Pastizal cultivado, 2. Agricultura de temporal, 3. Bosque de pino, 4. Bosque mesófilo de montaña, 5. Selva alta perennifolia, 6. Pastizal inducido y 7. Zona urbana.

forest to induced grassland as a potential threat. This situation involves, according to the intensive management of the induced grassland, impacts on biodiversity and the ecosystem services provided by the pine forest and CF. Consequently, the results demonstrate the vulnerability of forest vegetation cover in the micro-watershed due to land-use changes to agricultural activities.

A change of polygons from CF to pine forest (series II to IV) and later to PQF (categorized as pine forest for this analysis) in series VII (Figure 2) was identified during the homologation of the land use categories from the INEGI cartography, which is attributed to a change in the classification methodology by INEGI.

inducido en la microcuenca media después del 2007 (Figura 6) se pudo originar por la apertura de áreas para pastoreo que responden a la necesidad de forrajes para la producción ganadera. Tan solo para San Bartolo Tutotepec, la producción de carne en canal de ganado bovino aumentó 96.12 % del 2003 al 2014 (INEGI, 2004, 2017); asimismo, la disminución de la cobertura natural en este municipio fue identificada por Leija et al. (2021), quienes reportaron la producción de forrajes como el principal causante de la pérdida de 36.40 % de bosque en 29 años para un polígono de 8052.00 ha. Esto confirma las afectaciones al bosque por conversión a producción de forraje, a pesar de que la microcuenca solo abarca 46.21 % del municipio de San Bartolo Tutotepec, lo cual permite señalar el cambio de uso

This change could have been due to the generalization of the land use type, because the northeast of the micro-watershed is located in the municipality of Agua Blanca de Iturbide, which is among the top four timber producers of the state (INEGI, 2004, 2017). The total timber production volume of 17222 m³ log (year 2016) for this municipality compared to the figures for San Bartolo Tutotepec and Tenango de Doria, with timber production of 4002 and 383 m³ log, respectively, allows pointing out that forest land use is lower in the micro-watershed (INEGI, 2017). Furthermore, a major reforestation effort that could have caused the transition from CF to pine forest is ruled out, since by 2011 only 299 ha were reforested in the municipalities of San Bartolo Tutotepec and Tenango de Doria (CONAFOR, 2011). Therefore, due to changes in the recategorization of forest polygons in the INEGI cartography, there is no evidence of the 1107.10 % gain for the pine forest category.

Furthermore, before 2007, the sparse coverage of pine forest in the micro-watershed was verified with the vegetation type map of the Otomí-Tepehua region by Villavicencio and Pérez (2005) with data from 2004. In QGIS 2.18.10, this map was overlaid with the micro-watershed under study, and it was identified that 30 % of the area was covered by CF, 5 % by PQF, and 2 % by pine forest to the south of the micro-watershed. This highlights the lack of pine forest and PQF coverage and the greater existence of CF in the study area. In light of the points outlined in this section, it is important to consider that the reliability of INEGI's cartography for identifying vegetation cover should be assessed using detailed reference information for the year of analysis, along with field verification for more recent dates.

Spatial dynamics and location of land cover and land use changes

Between 1993 and 2018, rainfed agriculture and induced grassland were identified as the most unstable anthropogenic activities (Figure 4), with the lowest persistence rates (43.01 % and 50.40 %, respectively). In this context, aside from forest cover, induced grassland showed the largest increase (200.70 %) with a change rate of 3.75 %, while rainfed agriculture had the greatest decline (57 %) with a negative change rate of -2.38 % over the 25-year period (Table 3; Figure 3a). These changes led to the conversion of 1838.88 ha of rainfed agriculture, cloud forest, and urban areas into induced grassland in the middle micro-watershed, while 701.64 ha of CF, ER, and induced grassland changed into rainfed agriculture from the mid to lower micro-watershed (Figure 4).

The expansion of rainfed agriculture and induced grassland in forested areas in the middle part of the micro-watershed was also observed in sub-intervals A

de suelo de bosque a pastizal inducido como amenaza potencial. Esta situación involucra, según el manejo intensivo del pastizal inducido, afectaciones a la biodiversidad y los servicios ecosistémicos que albergan el bosque de pino y BMM. Por consiguiente, los resultados evidencian la vulnerabilidad de la cobertura vegetal de bosque en la microcuenca por el cambio de uso de suelo a actividades agropecuarias.

Durante la homologación de las categorías de uso de suelo de la cartografía del INEGI, se identificó el cambio de polígonos de BMM a bosque de pino (serie II a IV) y posteriormente a BPQ (categorizado como bosque de pino para este análisis) en la serie VII (Figura 2), lo que se atribuye a un cambio en la metodología de clasificación por el INEGI. Dicha modificación pudo deberse a la generalización del tipo de uso de suelo, ya que al noreste de la microcuenca se ubica el municipio de Agua Blanca de Iturbide que se encuentra entre los primeros cuatro productores maderables del estado (INEGI, 2004, 2017). El volumen de producción total de 17222 m³ rollo de madera (año 2016) para este municipio comparado con las cifras para San Bartolo Tutotepec y Tenango de Doria, con producción maderable de 4002 y 383 m³ rollo, respectivamente, permite puntualizar que el uso de suelo forestal es menor en la microcuenca (INEGI, 2017). Asimismo, se descarta una reforestación mayor que haya generado la transición de BMM a bosque de pino, ya que para 2011 solo se reforestaron 299 ha en los municipios de San Bartolo Tutotepec y Tenango de Doria (CONAFOR, 2011). Por lo tanto, debido a los cambios de recategorización de polígonos de bosque en la cartografía de INEGI, no existe certeza de la ganancia de 1107.10 % para la categoría de bosque de pino.

Para antes del año 2007, la cobertura escasa de bosque de pino en la microcuenca está verificada con el mapa de tipo de vegetación de la región Otomí-Tepehua realizado por Villavicencio y Pérez (2005) con datos del año 2004. En QGIS 2.18.10 se realizó la sobreposición de este mapa con la microcuenca de estudio y se identificó que 30 % de la zona estaba cubierto por BMM, 5 % por BPQ y 2 % por bosque de pino al sur de la microcuenca. Lo anterior remarca la cobertura carente de bosque de pino y BPQ y la mayor existencia de BMM en el área de estudio. Con lo puntualizado en este apartado, se debe considerar que la confiabilidad de la cartografía de INEGI para identificar las coberturas vegetales debe evaluarse con información de referencia detallada para el año de análisis y con la verificación en campo para fechas recientes.

Dinámica y ubicación espacial de los cambios de cobertura y uso del suelo

Durante el periodo 1993-2018, la agricultura de temporal y pastizal inducido se identificaron como las actividades antrópicas con mayor inestabilidad (Figura 4)

and B. Although in subinterval B, induced grassland gained importance over rainfed agriculture and showed the lowest percentage value of persistence (70.37 %) (Figure 6), the LCLUC dynamics indicate that the highest conversions with forest occurred during subinterval A, where rainfed agriculture and induced grassland persisted 54.34 and 69.27 %, respectively (Figure 5).

When considering the total forest area without differentiating between CF and pine forest, annual rates of change of 0.03, 0.16 and -0.12 % were calculated for the total interval (1993-2018) and subintervals A (1993-2007) and B (2007-2018), respectively. The annual rate of change for subinterval B (-0.12 %) is higher than that reported for the forest category in the Huasteca region (-0.04 %; Leija-Loredo & Pavón, 2017) and west-central Veracruz (-0.01 %; Partida-Sedas et al., 2017), as well as that estimated at the national level (-0.01 %; FAO, 2021). The annual rate of change of 0.06 % reported for forest in the middle zone of San Luis Potosí (Miranda-Aragón et al., 2013) is higher than that obtained in the micro-watershed for the total interval (0.03 %) and lower than that of subinterval A (0.16 %). Regarding this, several authors agree that the main drivers of LCLUC are the opening of agricultural and grazing areas (grassland), coupled with urban growth (Badillo-Saldaña et al., 2016; Cao et al., 2020; Chughtai et al., 2021). Consequently, the adverse conditions generated by these drivers of change reduce the population of flora and fauna. This decline is related to intensive management that directly influences the quantity and quality of the available resources (Badillo-Saldaña et al., 2016; Cao et al., 2020).

The above suggests that the threshold of anthropogenic disturbance that ecosystems support depends on the degree of intensity of agricultural activities (Vite et al., 2013). In the case of CF, changes in natural vegetation cover will reduce biodiversity and the quality of ecosystem services (Jiménez & Peterson, 2019). Regarding the Otomí-Tepehua region, the effects of LCLUC on CF have been pointed out by Castelán-Lorenzo and Navarrete-González (2022), who proposed that a 2 °C increase in temperature would generate a shift in the moisture condensation zone, which could lead to the disappearance of species. In this regard, the LCLUC in the micro-watershed represents a threat to the continuity of endangered endemic species, such as the Mexican beech (*Fagus grandifolia* subsp. *mexicana*) and the Veracruz quail (*Dendrortyx barbatus*) (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2010). The above highlights that in the upper and lower parts of the micro-watershed, there are areas susceptible to conservation and protection initiatives with cloud forest and evergreen rainforest, sites that are included in the state ecological land-use planning as conservation zones (Poder Ejecutivo, 2022). This

al presentar los valores menores de persistencia (43.01 y 50.40 %, respectivamente). En este sentido, exceptuando la cobertura vegetal de bosque, el pastizal inducido presentó la mayor ganancia (200.70 %) con tasa de cambio de 3.75 % y la agricultura de temporal registró la mayor pérdida (57 %) con tasa de cambio negativa (-2.38 %) en 25 años (Cuadro 3; Figura 3a). Lo anterior representó la conversión de 1838.88 ha de agricultura de temporal, BMM y zonas urbanas a pastizal inducido en la microcuenca media, y 701.64 ha de BMM, SAP y pastizal inducido a agricultura de temporal desde la parte media hasta la baja (Figura 4).

La expansión de la agricultura de temporal y pastizal inducido en zonas boscosas de la parte media de la microcuenca también se observó en los subintervalos A y B. A pesar de que en el subintervalo B, el pastizal inducido obtuvo importancia sobre la agricultura de temporal y mostró el valor porcentual menor de persistencia (70.37 %) (Figura 6), la dinámica del CCUS indica que las mayores conversiones con el bosque sucedieron durante el subintervalo A, donde la agricultura de temporal y pastizal inducido persistieron 54.34 y 69.27 %, respectivamente (Figura 5).

Al considerar la superficie total de bosque sin diferenciar entre BMM y bosque de pino, se calcularon las tasas de cambio anuales de 0.03, 0.16 y -0.12 % para el intervalo total (1993-2018) y los subintervalos A (1993-2007) y B (2007-2018), respectivamente. La tasa de cambio anual para el subintervalo B (-0.12 %) es más alta que la reportada para la categoría bosque en la región Huasteca (-0.04 %; Leija-Loredo & Pavón, 2017) y la zona centro occidental de Veracruz (-0.01 %; Partida-Sedas et al., 2017), así como de la estimada a nivel nacional (-0.01 %; FAO, 2021). La tasa de cambio anual de 0.06 % reportada para bosque en la zona media de San Luis Potosí (Miranda-Aragón et al., 2013) es superior a la obtenida en la microcuenca para el intervalo total (0.03 %) e inferior a la del subintervalo A (0.16 %). Varios autores coinciden que los principales motores del CCUS son la apertura de zonas agrícolas y de áreas para pastoreo (pastizal), sumados al crecimiento urbano (Badillo-Saldaña et al., 2016; Cao et al., 2020; Chughtai et al., 2021). Por consiguiente, las condiciones adversas generadas por estos motores de cambio reducen la población de la flora y fauna. Esta disminución se relaciona con un manejo intensivo que influye directamente en la cantidad y calidad de los recursos disponibles (Badillo-Saldaña et al., 2016; Cao et al., 2020).

Lo anterior sugiere que el umbral de disturbio antrópico que soportan los ecosistemas depende del grado de intensidad de las actividades agropecuarias (Vite et al., 2013). Para el caso del BMM, los cambios en la cobertura vegetal natural reducirán la biodiversidad y la calidad de los servicios ecosistémicos que proporciona (Jiménez

suggests the possibility of implementing conservation and species protection areas for sustainable management that aligns with municipal and local regulations, such as the municipal protected natural area of CF called “Medio Monte”, which encompasses 156.63 ha in San Bartolo Tutotepec (SEMARNAT, 2020).

The potential of LCLUC analysis, using an unsupervised classification approach along with INEGI’s land use cartography and the MOLUSCE tool, lies in obtaining an initial approximation to identify the main drivers of change affecting natural cover. It also facilitates the spatial visualization of regions where LCLUC is reduced. However, these analyses still pose several challenges related to data source uncertainty, methodologies, and the complexity of environmental evolution (Feng et al., 2023). Therefore, for the micro-watershed under study, historical research using satellite images and field verification of recent vegetation cover types is required to enhance the LCLUC analysis.

Conclusions

Over the 25 years of analysis, the dynamics of land cover and land use change (LCLUC) reflect the significance of agricultural activities, which cover 38.28 % of the micro-watershed, resulting in impacts on forest cover (57.84 %). The proposed hypothesis is validated, as agricultural activities represent the most significant anthropogenic influence affecting natural cover due to the opening of areas for grazing and rainfed agriculture, mainly near San Bartolo Tutotepec. The most substantial conversions occurred in the first decade (1993-2007), even though during subinterval B (2007-2018), induced grassland experienced the largest gain (278.10 %). It is recommended to implement reforestation and conservation programs for cloud forest, focusing on areas at high risk of LCLUC, and to promote sustainable agricultural and livestock practices that mitigate environmental impact and foster the recovery of ecosystem services.

Acknowledgments

MGHP thanks the Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) for the doctoral scholarship in Environmental Sciences (no. 802102).

& Peterson, 2019). En el caso de la región Otomí-Tepihua, las afectaciones por el CCUS en el BMM han sido puntualizadas por Castelán-Lorenzo y Navarrete-González (2022), quienes propusieron que el aumento de 2 °C en la temperatura generaría un desplazamiento de la franja de condensación de humedad, lo que ocasionaría la desaparición de especies. En este sentido, el CCUS en la microcuenca representa una amenaza para la continuidad de especies endémicas en peligro de extinción, tales como la haya mexicana (*Fagus grandifolia* subsp. *mexicana*) y la codorniz coluda veracruzana (*Dendrortyx barbatus*) (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2010). Lo anterior permite resaltar que en la parte alta y baja de la microcuenca existen zonas susceptibles a iniciáticas de conservación y protección con BMM y SAP, sitios que están incluidos en el ordenamiento ecológico territorial estatal como zonas de conservación (Poder Ejecutivo, 2022). Esto sugiere la posibilidad de implementar áreas de conservación y protección de especies para un manejo sustentable que se ajuste a las normativas municipales y locales, como lo es el área natural protegida de BMM de competencia municipal ‘Medio Monte’ con 156.63 ha en San Bartolo Tutotepec (SEMARNAT, 2020).

El potencial del análisis del CCUS, mediante una clasificación no supervisada y con el uso de la cartografía de uso de suelo de INEGI y la herramienta MOLUSCE, radica en obtener una primera aproximación que identifique los motores principales de cambio que afectan la cobertura natural; de igual manera, facilita la visualización espacial de las regiones donde se atenúan los CCUS. Estos análisis aún plantean varios desafíos que radican en la incertidumbre de las fuentes de datos, las metodologías y la complejidad de la evolución ambiental (Feng et al., 2023). Por lo tanto, para la microcuenca de estudio se requiere investigación histórica mediante imágenes satelitales y verificación en campo del tipo de cobertura vegetal para fechas recientes, que permita ampliar el análisis del CCUS.

Conclusiones

Durante los 25 años de análisis, la dinámica del del cambio de cobertura y uso del suelo (CCUS) responde a la importancia de las actividades agropecuarias que cubren 38.28 % de la microcuenca, lo que genera impactos a la cobertura de bosque (57.84 %). Se valida la hipótesis planteada, ya que las actividades agropecuarias representan la mayor actividad antrópica que ha afectado la cobertura natural debido a la apertura de zonas de pastoreo y agricultura de temporal, principalmente en lugares aledaños a San Bartolo Tutotepec. Las mayores conversiones sucedieron en la primera década (1993-2007), a pesar

End of English version

References / Referencias

- Asia Air Survey, & NextGIS. (2013). *MOLUSCE – quick and convenient analysis of land cover changes*. https://nextgis.com/blog/molusce_2013/
- Badillo-Saldaña, L. M., Ramírez-Bautista, A., & Wilson, L. D. (2016). Effects of establishment of grazing areas on diversity of amphibian communities in tropical evergreen forests and mountain cloud forests of the Sierra Madre Oriental. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 87(1), 133–139. <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2015.09.019>
- Cao, Q., Liu, Y., Georgescu, M., & Wu, J. (2020). Impacts of landscape changes on local and regional climate: A systematic review. *Landscape Ecology*, 35, 1269–1290. <https://doi.org/10.1007/s10980-020-01015-7>
- Castelán-Lorenzo, M., & Navarrete-González, M. (2022). Cambio climático y afectaciones en la franja de condensación del bosque de niebla en la Sierra Otomí-Tepehua, Hidalgo, México. *Current Topics in Agronomic Science*, 2(2), 23–29. <https://doi.org/10.5154/r.ctasci.2022.04.01a>
- Chughtai, A. H., Abbasi, H., & Karas, I. R. (2021). A review on change detection method and accuracy assessment for land use land cover. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 22, 100482. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100482>
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2011). *Programa ProÁrbol 2011*. <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/6/2045Hidalgo.pdf>
- Dixon, B., & Uddameri, V. (2015). GIS for land use impact assessment. In B. Dixon, & V. Uddameri (Eds.), *GIS and Geocomputation for Water Resource Science and Engineering* (pp. 359–388). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781118826171.ch24>
- Food and Agriculture Organization. (FAO). (1996). *Forest resources assessment 1990: survey of tropical forest cover and study of change processes*. Author. <http://www.fao.org/3/w0015e/W0015E00.htm#TOC>
- Food and Agriculture Organization. (FAO). (2021). *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2020*. Author. <https://doi.org/10.4060/ca9825es>
- Feng, H., Wang, S., Zou, B., Nie, Y., Ye, S., Ding, Y., & Zhu, S. (2023). Land use and cover change (LUCC) impacts on Earth's environments: Research progress and prospects. *Advances in Space Research*, 71(3), 1418–1435. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.09.054>
- GISLAB. (2014). *Landscape change analysis with MOLUSCE*. https://wiki.gis-lab.info/w/Landscape_change_analysis_with_MOLUSCE_-_methods_and_algorithms#Area_Analysis
- Gutiérrez, M. F., Rodríguez-Tapia, G., & 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). <https://doi.org/10.14350/ig.48600>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2001a). *Continuo Nacional serie I. Provincias fisiográficas. Escala 1:1000000*. <https://www.inegi.org.mx/app/mapas/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2001b). *Conjunto de datos vectoriales de la carta de uso del suelo y vegetación. Serie II. Escala 1:250000*. <https://www.inegi.org.mx/app/mapas/>
- de que en el subintervalo B (2007-2018) el pastizal inducido presentó la mayor ganancia (278.10 %). Se recomienda implementar programas de reforestación y conservación del bosque mesófilo de montaña con énfasis en áreas de alto riesgo de CCUS y promover prácticas agrícolas y ganaderas sustentables que mitiguen el impacto ambiental y fomenten la recuperación de los servicios ecosistémicos.
- ### Agradecimientos
- MGHP agradece al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por la beca de doctorado en Ciencias Ambientales (núm. 802102).
- ### Fin de la versión en español
- =====
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2004). *Anuario estadístico del estado de Hidalgo. Tomo II*. <https://www.inegi.org.mx/app/publicaciones/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2006). *Conjunto de datos vectoriales precipitación. Escala 1:1000000*. <https://www.inegi.org.mx/app/mapas/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2007). *Conjunto de datos vectoriales temperatura. Escala 1:1000000*. <https://www.inegi.org.mx/app/mapas/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2009). *Conjunto de datos vectoriales de la carta de uso del suelo y vegetación. Serie IV. Escala 1:250000*. <https://www.inegi.org.mx/app/mapas/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2017). *Anuario estadístico y geográfico de Hidalgo*. <https://www.inegi.org.mx/app/publicaciones/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2018). *Conjunto de datos vectoriales de la carta de uso del suelo y vegetación. Serie VII. Escala 1:250000*. <https://www.inegi.org.mx/app/mapas/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2021). *Simulador de flujos de aguas de cuencas hidrográficas SIATL v4.0*. https://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/
- Jiménez, G. D., & Peterson, A. T. (2019). Impacto del cambio climático sobre las especies de árboles amenazadas del bosque mesófilo en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 90. <https://doi.org/10.22201/jb.20078706e.2019.90.2781>
- Leija-Loredo, E. G., & Pavón, N. P. (2017). The northernmost tropical rain forest of the Americas: endangered by agriculture expansion. *Tropical Ecology*, 58(3), 641–652. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:132824288>
- Leija, E. G., Pavón, N. P., Sánchez-González, A., & Ángeles-Pérez, G. (2021). Dinámica espacio-temporal de uso, cambio de uso y cobertura de suelo en la región centro de la Sierra Madre Oriental: Implicaciones para una estrategia REDD+ (Reducción de Emisiones por la Deforestación y Degradación). *Revista Cartográfica*, (102), 43–68. <https://doi.org/10.35424/rcarto.1102.832>

- Miranda-Aragón, L. M., Treviño-Garza, E. J., Jiménez-Pérez, J., Aguirre-Calderón, O. A., González-Tagle, M. A., Pompa-García, M., & Aguirre-Salado, C. A. (2013). Tasa de deforestación en San Luis Potosí, México (1993-2007). *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 19(2), <https://doi.org/10.5154/rchscfa.2011.06.044>
- Ochoa-Ochoa, L. M., Mejía-Domínguez, N. R., & Bezaury-Creel, J. (2021). Prioritization for the conservation of Mexico's cloud forests. *Natural Resources Conservation and Research*, 4(1), 7–20. <https://doi.org/10.24294/nrcr.v4i1.1550>
- Partida-Sedas, S., Cabal-Prieto, A., Sánchez-Arellano, L., & Muñoz-Torres, J. P. (2017). Análisis de la reducción estructural del bosque mesófilo de montaña en Huatusco, Veracruz, México. *Agro Productividad*, 10(6). <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/1041>
- Pande, C. B. (2020). Watershed management and development. In C. B. Pande (Ed.), *Sustainable Watershed Development* (13–26). Springer Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-47244-3_2
- Perović, V., Jakšić, D., Jaramaz, D., Koković, N., Čakmak, D., Mitrović, M., & Pavlović, P. (2018). Spatio-temporal analysis of land use/land cover change and its effects on soil erosion (Case study in the Oplenac wine-producing area, Serbia). *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(11), 675. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-7025-4>
- Poder Ejecutivo. (2022). Decreto gubernamental por el que se expide el ordenamiento ecológico territorial del estado de Hidalgo. *Periódico oficial del estado de Hidalgo*. https://periodico.hidalgo.gob.mx/?tribe_events=periodico-oficial-alcance-4-del-25-de-febrero-de-2022
- Pontius Jr., R. G., Shusas, E., & McEachern, M. (2004). Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 101(2-3), 251–268. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2003.09.008>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2010). Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio. *Diario Oficial de la Federación*. https://dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5173091
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2020). Certificado de Preservación 01/2020. Se declara como Área Natural Protegida, en la categoría de zona de preservación ecológica, el área denominada 'Medio Monte'. *Periódico oficial del estado de Hidalgo*. https://periodico.hidalgo.gob.mx/?tribe_events=Periodico-Oficial-Ordinario-0-del02-de-marzo-de-2020
- QGIS.org. (2019). *QGIS 2.18. QGIS user guide. QGIS Association*. <https://docs.qgis.org/2.18/pdf/es/QGIS-2.18-UserGuide-es.pdf>
- Toledo-Aceves, T., Günter, S., Guariguata, M. R., García-Díaz, M., & Zhunusova, E. (2022). Financial revenues from timber harvesting in secondary cloud forests: A Case study from Mexico. *Forests*, 13(9), 1496. <https://doi.org/10.3390/f13091496>
- Villavicencio, M. Á., & Escandón, B. E. P. (2005). *Guía de la flora útil de la Huasteca y la Zona Otomí-Tepehua*. UAEH.
- Vite, A., Pulido, M. T., & Flores-Vázquez, J. C. (2013). Estrategia estatal de conservación de las cicadas (*Zamiaceae*): una propuesta para el estado de Hidalgo, México. *Revista de Biología Tropical*, 61(3), 1119–1131. <https://www.scielo.sa.cr/pdf/rbt/v61n3/a11v61n3.pdf>