

## Modelación y Proyección del Cambio de Uso del Suelo en Tenosique, Tabasco, México Modeling of Land use Change and Projection in Tenosique, Tabasco, Mexico

Miguel Ángel Palomeque-de la Cruz<sup>1</sup>, Silvia del Carmen Ruíz-Acosta<sup>2</sup>,  
Tania Gudelia Núñez-Magaña<sup>1</sup>, Rodimiro Ramos-Reyes<sup>3</sup>,  
Adalberto Galindo-Alcántara<sup>1</sup> y Miguel Alberto Magaña-Alejandro<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, División Académica de Ciencias Biológicas. Carretera Villahermosa-Cárdenas km 0.5, Entronque a Bosques de Saloya. 86150 Villahermosa, Tabasco, México; (M.A.P.C.), (T.G.N.M.), (A.G.A.), (M.A.M.A.).

<sup>2</sup> Autor para correspondencia: adalberto.galindo@ujat.mx

<sup>2</sup> Tecnológico Nacional de México, IT Zona Olmeca. Ignacio Zaragoza s/n, Lomas de Ocuilzapotlán Uno. 86270 Ocuilzapotlán, Tabasco, México; (S.C.R.A.).

<sup>3</sup> El Colegio de la Frontera Sur, Unidad Villahermosa. Carretera a Reforma km 15.5 s/n. Ra. Guineo 2da. Sección. 86280 Centro, Tabasco, México; (R.R.R.).

### RESUMEN

Tenosique, Tabasco es un importante territorio transfronterizo entre México y Guatemala por la presencia de selvas tropicales que brindan un espacio óptimo para el mantenimiento de la biodiversidad y la prestación de servicios ambientales. Sin embargo, se desconoce su actual dinámica espacial; información relevante para la creación de estrategias planificación ambiental en el Sureste de México. Por tal motivo, el objetivo de este trabajo fue modelar el cambio de uso del suelo de 1997 a 2009 y 2016), mediante Land Change Modeler. Además, mediante modelos de transición estocástica (cadenas de Markov y autómatas celulares) se construyó un escenario a 2030. Los resultados muestran una pérdida de selvas de más de 30 000 ha de 1997 al 2016 que fueron transformadas en vegetación secundaria, pero principalmente en pastizales para la ganadería bovina. De seguir esta tendencia se esperaría que para 2030 la superficie de selvas en el municipio se redujera al 7% de la superficie. Este trabajo señala que es necesario establecer nuevas estrategias de conservación, restauración y manejo a través de un programa de ordenamiento ecológico del municipio en coordinación con las autoridades federales que manejan el Área de Protección de Flora y Fauna, Cañón del Usumacinta.

**Palabras clave:** autómatas celulares, cadenas de Markov, ordenamiento ecológico territorial.

### SUMMARY

Tenosique, Tabasco is an important cross-border territory between Mexico and Guatemala due to the presence of tropical forests that provide an optimal space for the maintenance of biodiversity and the provision of environmental services. However, its current spatial dynamics are unknown, relevant information for the creation of environmental planning strategies in the Southeast of Mexico. For this reason, the objective of this work was to model land use change from 1997 to 2009 and 2016, using the Land Change Modeler. In addition, a 2030 scenario was constructed using stochastic transition models (Markov chains and cellular automata). The results show a loss of forests of more than 30 000 ha from 1997 to 2016 that were transformed into secondary vegetation, but mainly into pastures for cattle ranching. If this trend continues, it is expected that by 2030 the area of forests in the municipality will be reduced to 7% of the area. This work indicates that it is necessary to establish new conservation, restoration, and management strategies through an ecological management program of the municipality in coordination with the federal authorities that manage the Flora and Fauna Protection Area, Usumacinta Canyon.

**Index words:** cellular automata, Markov chains, territorial ecological planning.



#### Cita recomendada:

Palomeque-de la Cruz, M. A., Ruíz-Acosta, S. C., Núñez-Magaña, T. vG., Ramos-Reyes, R., Galindo-Alcántara, A., & Magaña-Alejandro, M. A. (2025). Modelación y Proyección del Cambio de Uso del Suelo en Tenosique, Tabasco, México. *Terra Latinoamericana*, 43, 1-14. e1821. <https://doi.org/10.28940/terra.v43i.1821>

Recibido: 12 de septiembre de 2024.

Aceptado: 9 de octubre de 2024.

Artículo. Volumen 43.

Enero de 2025.

Editor de Sección:

Dr. Fernando Ayala Niño

Editor Técnico:

Dr. Gerardo Cruz Flores



**Copyright:** © 2025 by the authors.

Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC ND) License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## INTRODUCCIÓN

Aproximadamente tres cuartas partes de la superficie terrestre de la Tierra han sido alteradas por los humanos en el último milenio (Winkler, Fuchs, Rounsevell y Herold, 2021). Algunos autores coinciden en que el cambio de uso del suelo para producir bienes y servicios representa el motor de la dinámica que condiciona el destino de los ecosistemas terrestres (Haberl, Erb y Krausmann, 2014; Vitousek, Mooney, Lubchenco y Melillo, 1997). El impacto del crecimiento en la población a nivel mundial y la necesidad de subsistencia a través de la extracción de los recursos naturales ha crecido a niveles sin precedentes presionando al cambio de usos del suelo de los ecosistemas naturales transformándose en zonas agropecuarias o urbanas. (Hasan, Zhen, Miah, Ahamed y Samie, 2020; Molotoks, Smith y Dawson, 2021; Surya, Ahmad, Sakti y Sahban, 2020).

Winkler *et al.* (2021) analizaron los datos de HILDA (Historic Land Dynamics Assessment) e identificaron una pérdida neta global del área forestal de 0.8 millones de km<sup>2</sup> y una expansión de tierras de cultivo y pastizales de 1.0 y 0.9 millones de km<sup>2</sup> respectivamente. Al comparar la tasa de cambio global en el uso de la tierra encontraron que el área afectada por el cambio global de uso del suelo es 3.7 veces mayor a las estimaciones previas (Winkler *et al.*, 2021). Algunos de los efectos más importantes del cambio de uso del suelo son la pérdida de la biodiversidad, el calentamiento global y el cambio climático (Molotoks *et al.*, 2021; O'Neill *et al.*, 2020). Por su parte Liu, Zhang, Li y Xie (2013) señalan que el estudio del cambio de uso del suelo es la base para conocer y contrarrestar las tendencias de los procesos de deforestación, degradación, desertificación, pérdida de la biodiversidad, y cambio climático (Hasan *et al.*, 2020; Malhi *et al.*, 2020).

Otra razón por la que resulta relevante conocer los actuales patrones de cambio de uso del suelo, es para estimar cómo estos influyen en la perturbación de los ecosistemas y establecer políticas de ordenamiento ecológico territorial (Eastman y Toledano, 2018).

En México, Galicia, García, Gómez y Ramírez (2007) contabilizaron los bosques y otras áreas con vegetación natural estimando su extensión en aproximadamente 74% del territorio (1 461 000 km<sup>2</sup>). De estas, casi 50% correspondían a bosques templados y selvas tropicales que son ecosistemas de gran importancia por los servicios ecosistémicos que ofrecen. Una de las zonas de mayor importancia ecosistémica en el país es la región Sureste conformada por los estados de Yucatán, Quintana Roo, Campeche, Chiapas y Tabasco. Palma-López *et al.* (2011) señalan que el sureste mexicano es una región tropical, biológicamente rica en el planeta con un gran volumen de recursos naturales.

En Tabasco, hasta hace algunos años la vegetación dominante eran las selvas tropicales y los pantanos (Tudela, 1989), sin embargo, en la actualidad la entidad cuenta con menos de 5% de su superficie con cobertura forestal y una tasa muy alta de transformación de selvas y humedales en pastizales y zonas urbanas (Palomeque, Galindo, Sánchez y Escalona, 2017a). Para proteger parte del patrimonio natural del estado, en 1992 se decreta la Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla (SEGOB, 1992) y en 2005 se decreta el Parque Estatal Cañón del Usumacinta como reserva estatal y esta misma, en 2008 se promueve como Área de Protección de Flora y Fauna Silvestre (SEGOB, 2008). Estas son dos de las áreas naturales protegidas más importantes del país y por supuesto de la entidad.

El municipio de Tenosique, Tabasco, es muy importante por ser un territorio transfronterizo entre México y Guatemala. En este se ubica parte de una de las mayores reservas de agua dulce del país por su elevado régimen de precipitación pluvial. La combinación de humedad con altas temperatura entre otros elementos favoreció la presencia de extensas zonas de cobertura de selva alta perennifolia y con ello la presencia de una gran diversidad biológica (Isaac-Márquez *et al.*, 2005; Soares y García, 2017). Esta característica favorece el papel del Área de Protección de Flora y Fauna "Cañón del Usumacinta" como parte del corredor biológico mesoamericano (Arriaga *et al.*, 2000; SEGOB, 2008).

Desafortunadamente la presencia de actividades agrícolas, pecuarias y agroindustriales sin control persisten aún; además se han construido vías férreas para la operación del Tren Maya que ocasionará un incremento en estas actividades para atender la oferta turística, así como un incremento en la derrama económica (Arreola-Muñoz, Reyes, Segura, Hernández y López, 2011; Manjarrez-Muñoz *et al.*, 2007).

### Antecedentes del Área de Estudio

Ramírez-García *et al.* (2022) señalan que en 1947 la Región de los Ríos (donde se ubica Tenosique) contaba con 82.3% de cobertura de vegetación natural en la que predominaban las selvas altas perennifolia, mediana subperennifolia y mediana subcaducifolia ubicadas principalmente en la zona serrana del municipio (Ramírez-García *et al.*, 2022). En tanto que las zonas bajas de la planicie eran dominadas por la selva baja inundable y bosques de tinto (Galindo-Alcantara *et al.*, 2000<sup>1</sup>).

<sup>1</sup> Galindo-Alcántara, A., Ruiz-Acosta, S., Zenteno-Ruiz, C. E., Sol-Sánchez, A., Bouchot-Carranco, C., & Izquierdo-Ramírez, M. (2000). *Diagnóstico Integral de la Sierra de Tenosique: Sustento técnico de la propuesta de decreto de un área natural protegida*. Tabasco, México: Secretaría de Desarrollo Social y Protección Ambiental-Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

Sin embargo, la historia de la gran devastación de la selva alta perennifolia inició en la primera década del siglo XX por la influencia de la colonización, las actividades agrícolas de roza-tumba-quema y la ganadería bovina en México que tomó fuerza a partir de la crisis platanera de mediados del siglo XX (Manjarrez-Muñoz *et al.*, 2007).

Para el estado de Tabasco la puesta en marcha del Plan Balancán-Tenosique aceleró la transformación de 115 mil hectáreas de vegetación silvestre bajo la idea de impulsar la modernización socioeconómica de Tabasco haciendo de éste el granero de México y el primer introductor de carne para la Ciudad de México (Isaac-Márquez, 2008<sup>2</sup>; Jiménez y Lara, 2023).

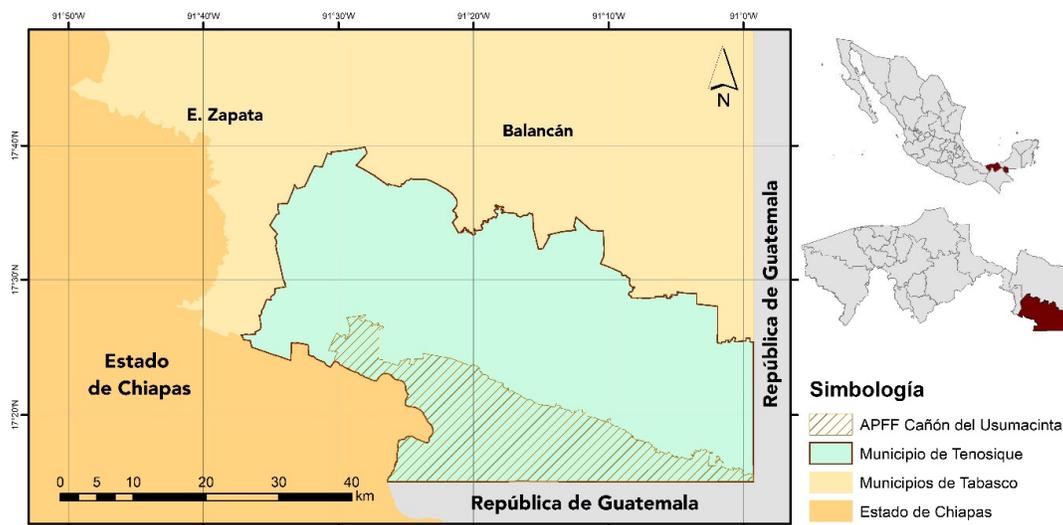
De esta manera, bajo la premisa de la aplicación de políticas de transformación del paisaje a través de la intervención de pequeños y grandes productores con el objetivo de consolidar a Tabasco, en 1984 para la zona de los Ríos el pastizal ya ocupaba más de la mitad de la región en tanto que la selva alta perennifolia y la selva fragmentada ocupaban solo 12.9% de la región (Cámara-Cabrales *et al.*, 2011; Gallardo-Cruz, de Oca y Rives, 2019; Ramírez-García *et al.*, 2022; Torres-Bernardino, 2018).

## Ubicación del Área de Estudio

El municipio de Tenosique la porción sureste del estado de Tabasco en la en la frontera con Guatemala, al norte colinda con el municipio de Balancán y al oeste con el estado de Chiapas y el municipio de Emiliano Zapata. Su extensión territorial es de 1 883.19 km<sup>2</sup>, con una de población de 59 814 habitantes (Figura 1; INEGI, 2021).

Su clima es cálido húmedo con lluvias todo el año Af(w) (García, 2004), en tanto que su relieve se divide en tres grandes zonas morfológicas. La primera de estas se localiza al sur en la zona limítrofe con Guatemala donde un macizo montañoso con altitud máxima de 650 metros cuenta con coberturas de selva alta perennifolia formando el Área de Protección de Flora y Fauna "Cañón del Usumacinta". Le sigue una zona de transición formada por lomeríos con altitudes entre 20 y 60 m de pendientes suaves que conectan con la última zona formada por la planicie (menos de 20 m de altitud) y que se distribuye en la zona norte del municipio (Galindo-Alcantara *et al.*, 2000<sup>1</sup>; POET, 2005).

Ante la importancia estratégica de esta área natural protegida para la conservación, el objetivo de este trabajo fue modelar el cambio de uso del suelo en el municipio de Tenosique, Tabasco en los periodos (1997-2009-2016) y construir un escenario probabilístico y espacial al 2030.



**Figura 1. Localización del área de estudio (elaborado por los autores SEGOB, 2008; INEGI, 2021).**

**Figure 1. Location of the study area (prepared by the authors based on SEGOB, 2008; INEGI, 2021).**

<sup>2</sup> Isaac-Márquez, R. (2008). *Análisis del cambio de usos del suelo en los municipios de Balancán y Tenosique*. Tesis para obtener el grado de Doctor en Ciencias. Colegio de la Frontera Sur. Disponible en [https://ecosur.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1017/1843/1/100000045509\\_documento.pdfvvvv](https://ecosur.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1017/1843/1/100000045509_documento.pdfvvvv)

## MATERIALES Y MÉTODOS

Land Change Modeler (LCM) for Ecological Sustainability, es un módulo de análisis ráster de TERRSET y está diseñado para la planificación del uso del suelo, debido a que simplifica las complejidades del análisis de cambio de cobertura y emplea el cambio histórico de la cobertura para modelar empíricamente la relación entre las transiciones de la cubierta terrestre (Camacho-Olmedo, Molero y Paegelow, 2010; Eastman y Toledano, 2018). De acuerdo con Geng, Shen, Cheng y Dai (2022), los modelos de análisis basados en autómatas celulares y cadenas de Markov son la mejor opción para el análisis del cambio de usos del suelo. Estos combinados con cadenas de Markov son modelos geomáticos con base en transición muy útiles para proyectar impactos ambientales y socioeconómicos potenciales; además, para la evaluación de las políticas de manejo sobre el uso de suelo (de Koning, Verburg, Veldkamp y Fresco, 1999; Veldkamp y Lambin, 2001).

### Construcción de la Base de Datos

Se descargó información en formato shapefile con la temática de vegetación y usos del suelo para los años 1997, 2009 y 2016, con escala 1:250 000 con el sistema de referencia geográfica UTM Zona 15 Norte, y DATUM WGS84 (INEGI, 2022). La información descargada muestra la distribución del uso del suelo agrícola, pecuario y forestal, la vegetación natural e inducida y otros usos (INEGI, 2022).

Land Change Modeler (LCM) de IDRISI TerrSet® (Eastman, 2020) utiliza capas en formato ráster por lo que los archivos vectoriales descargados fueron transformados con el comando Polygon to Raster de ArcToolbox Arc Gis 10.8® (ESRI, 2022).

Para unificar las categorías en las tres capas ráster se realizó una reclasificación con el comando RECLASS de (Eastman, 2020) presentando las siguientes categorías: Selvas (Sv), Vegetación secundaria (Vs), Humedales (Hum), Agrícola de temporal (Agt), Pastizal (Pz), y Urbano (Ur).

### Análisis del Cambio de Uso del Suelo con LCM (1997-2009-2016)

Una vez transformadas las capas vectoriales a ráster, se utilizó el LCM para realizar el análisis espacio temporal en dos periodos de tiempo de 1997 a 2009 y de 2009 a 2016. Para ello se ejecuta un cruce de capas que permite identificar pixel por pixel, los cambios de un periodo a otro y calcular de esta forma la superficie ganada o perdida así como identificar qué tipo de uso del suelo le sustituye (transiciones), (Eastman y Toledano, 2018).

### Análisis de las Transiciones de Usos del Suelo

Un aspecto importante en la evaluación del cambio de uso del suelo, es identificar qué elemento es el que está promoviendo el cambio, para ello se analizan las transiciones identificando en los mapas generados que elemento sustituye a otro espacial y temporalmente (Romero-Rodríguez, Aguilar, Santoyo y Diakite, 2022).

### Construcción de la Probabilidad de Cambio con Cadenas de Márkov (2030)

Para el cálculo de la probabilidad de cambio se construyó una matriz de probabilidad mediante Cadenas de Márkov usando el comando MARKOV del software IDRISI TerrSet® (Eastman, 2020; Eastman y Toledano, 2018). El método consistió en cruzar dos periodos de tiempo y analizar las relaciones de vecindad para los pixeles que cambian de un periodo y con ello simular un tercer periodo. La matriz markoviana 2030 se construyó cruzando las imágenes de 2009 y del 2016, con una proyección 2030. El resultado fue una matriz de transición que explica las probabilidades de cambio de uso del suelo al futuro.

### Proyección Espacial con Autómatas Celulares al 2030

Una vez determinada la matriz de probabilidad se empleó el modelo de Autómatas Celulares, mediante el uso del módulo CA-Markov del software IDRISI TerrSet® (Eastman, 2020) para simular un escenario de vegetación y usos del suelo al 2030. La predicción fue construida a partir de la imagen de 2016, la matriz de probabilidad de transición al 2030 y la colección de imágenes de áreas de transición al 2030 (Eastman, 2020; Eastman y Toledano, 2018).

Los modelos basados en autómatas celulares se encuentran entre los algoritmos más notables para realizar simulaciones de cambio de usos del suelo debido a sus principios dinámicos (Xie, Zhang, Zhao y Tong, 2022). Sin embargo, los modelos puros de autómatas celulares simplemente consideran las interacciones inmediatas entre las celdas en lugar de la relación impulsora del cambio de uso con factores externos, lo que conduce a simulaciones poco convincentes en la práctica (Xu, Zhu y Lui, 2023). Por lo tanto, desarrollar modelos híbridos que integren autómatas celulares con otros métodos de modelado se ha convertido en una estrategia más adecuada (Siegel et al., 2022). El cambio de usos del suelo es un proceso no lineal que contiene dependencias espacio-temporales complejas que aún son difíciles de modelar mediante los métodos existentes. En este artículo se propuso la combinación de autómatas celulares con cadenas de Markov para probar el rendimiento del modelo.

### Escenario de Cambio en el Uso del Suelo del 2016 al 2030

Una vez generado el escenario del 2030, este se compara mediante LCM con la imagen del 2016 para obtener las matrices de cambio y de este modo se calcularon las contribuciones entre categorías para el periodo del 2016 al 2030.

### Cálculo de las Tasas de Cambio de Uso del Suelo

Para los tres periodos de tiempo estudiados, se calcularon las tasas de cambio mediante la siguiente fórmula:

$$Tc = \left( \left[ \frac{S_2}{S_1} \right]^{1/n} * 100 \right) - 100 \quad (1)$$

Dónde:  $S_1$ , es el área cubierta al inicio del período,  $S_2$ , es el área cubierta al final del periodo,  $n$ , es el número de años del periodo de análisis,  $Tc$ , es la tasa de cambio del periodo analizado (Galindo-Alcantara et al., 2022<sup>3</sup>)

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Cambios en la Vegetación y Usos del Suelo

#### Selvas Tropicales

Las áreas de selva en el municipio de Tenosique se encontraron ubicadas principalmente en la zona sur colindante con la república de Guatemala sobre la zona serrana del municipio. De acuerdo con Galindo-Alcantara et al. (2000<sup>1</sup>), este tipo de vegetación esta representada en la región por grandes porciones de selva alta perennifolia y selva mediana subperennifolia en las que predominan especies como el chicozapote (*Manilkara zapota*), zapote (*Pouteria zapota*), ramón (*Brosimum alicastrum*), guapaque (*Dialium guianense*) y canshán (*Terminalia amazonia*) (SEGOB, 2008). Otros tipos de selvas presentes en el área de estudio son las selvas bajas inundables distribuidas en las zonas de planicie colindantes a los ríos San Pedro y Usumacinta. Estas se caracterizan por la presencia de tinto (*Haematoxylum campechianum*) y pukjté (*Bucidas bucera* L.).

El resultado de la clasificación de la imagen para 1997 mostró que en el área analizada la vegetación silvestre ocupaba más de 70 mil hectáreas. Esta se integró por 46 mil ha de selvas (24%) y 23 000 ha de vegetación secundaria (12%) (Cuadro 1).

Para 2009 la superficie de selvas disminuyó de forma importante perdiendo más de 30 mil ha (Cuadro 1). Esta vegetación se transformó en vegetación secundaria por el aprovechamiento selectivo de la selva y en pastizales con la pérdida absoluta de la cobertura selvática (Cuadro 2). Al comparar las imágenes de 1997 y 2009, se observa que espacialmente las zonas de mayor impacto se encuentran en la zona sur donde se observa un adelgazamiento de los cordones de selva sobre las zonas serranas (Figura 2 y 3). Una segunda zona de impacto se aprecia al este del municipio sobre la colindancia con la República de Guatemala.

Para el 2016 la velocidad en el cambio registró un marcado descenso pasando de una  $Tc$  de 11.7 en el periodo previo a una  $Tc$  de 0.75 en el lapso de 2009 a 2016 lo que resultó en la pérdida de un total de 1134 ha (Cuadro 1). De esta superficie el 75% se transformó en pastizales con un total de 1230 ha y el resto en vegetación secundaria (Cuadro 3).

<sup>3</sup> Galindo-Alcantara, A., Ruiz-Acosta, S. del C., Palomeque-de la Cruz, M. A., Mastachi-Loza, C. A., Morales-Hernández, A., & Gómez-Albores, M. A. (2022). *Patrones Ecológicos de la cuenca baja del Río Grijalva*. México: Conacyt-Conagua.

**Cuadro 1. Cuantificación del cambio de uso del suelo en Tenosique, Tabasco del 1997 al 2009 y 2009 al 2016.**  
**Table 1. Quantification of land use change in Tenosique, Tabasco from 1997 to 2009 and from 2009 to 2016.**

Categoría	1997		2009		2016		Cambio Neto		
	ha	%	ha	%	ha	%	97-09	09-16	97-16
Sv	46 926	24.8	17 336	9.1	16 202	8.6	-29 590	-1134	-30 724
Vs	23 245	12.3	33 206	17.5	35 406	18.7	9 961	2200	12 161
Hu	15 336	8.1	14 963	7.9	14 978	7.9	-373	15	-358
Ag	5200	2.7	10 328	5.5	11 918	6.3	5128	1590	6718
Pz	98 491	52.0	113 236	59.8	109 366	57.7	14 745	-3870	10 875
Ah	280	0.1	410	0.2	1607	0.8	130	1197	1327
Total	189 478		189 479		189 477				
Continua	Ganancias (g) y Pérdidas (p)				Tasa de cambio (Tc)				
	1997 - 2009		2009 - 2016		1997 - 2009		2009 - 2016		1997-2016
	g	p	g	p	Tc		Tc		Tc
Sv	1440	-31 030	500	-1634	-11.70		-0.75		-6.06
Vs	25 236	-15 275	10 474	-8273	4.56		0.72		2.51
Hu	3960	-4334	416	-401	-0.31		0.01		-0.14
Ag	7666	-2538	2117	-527	8.96		1.60		5.00
Pz	33 815	-19 350	9241	-13 111	1.76		-0.39		0.62
Ah	130	0	1199	0	4.88		16.39		10.83

Selvas = Sv; Vegetación secundaria = Vs; Humedales = Hu; Agricultura = Ag; Pastizal = Pz; Asentamientos humanos = Ah.  
 Tropical forest = Sv; Vegetation secondary = Vs; Wetland = Hu; Agriculture = Ag; Grass = Pz; Human settlements = Ah.

De esta forma en los 19 años que abarcó este estudio, el total de selvas perdidas en el municipio de Tenosique fue de un poco más de 32 mil ha lo que corresponde a una tasa global de cambio de usos del suelo (Tc) de 6.6% con una superficie neta de 30 724 ha (Cuadro 1).

El análisis de transiciones para el periodo 97-09 mostró que la pérdida de 31.9 mil ha de selvas tienen su origen en la conversión a 14 mil ha de pastizales y la explotación de 15.5 mil ha a acahuales. En este mismo periodo el análisis de las imágenes muestra una ligera recuperación de 1.2 mil ha de selvas del tipo selva baja inundable superficie que representó 4% de la selva perdida. En total para el periodo 07-16 la selva perdida se repartió equitativamente para vegetación secundaria y pastizales con el 49% para cada uno (Cuadro 4).

**Cuadro 2. Transiciones registradas para el municipio de Tenosique en el periodo de 1997 a 2009.**  
**Table 2. Transitions recorded for the municipality of Tenosique in the period from 1997 to 2009.**

	Sv	Vs	Hu	Ag	Pz	Ah	Pérdidas
	----- ha -----						
Sv		15 547.5	1073.3	321.8	14 087.3		31 029.8
Vs	283.5		364.5	450.0	14 177.3		15 275.3
Hu	481.5	465.8		177.8	3204.0	4.5	4333.5
Ag		126.0	65.3		2346.8		2538.0
Pz	675.0	9096.8	2457.0	6716.3		125.5	19 070.5
Ah							

Selvas = Sv; Vegetación secundaria = Vs; Humedales = Hu; Agricultura = Ag; Pastizal = Pz; Asentamientos humanos = Ah.  
 Tropical forest = Sv; Vegetation secondary = Vs; Wetland = Hu; Agriculture = Ag; Grass = Pz; Human settlements = Ah.

**Cuadro 3. Transiciones registradas para el municipio de Tenosique en el periodo de 2009 a 2016.**  
**Table 3. Transitions recorded for the municipality of Tenosique in the period from 2009 to 2016.**

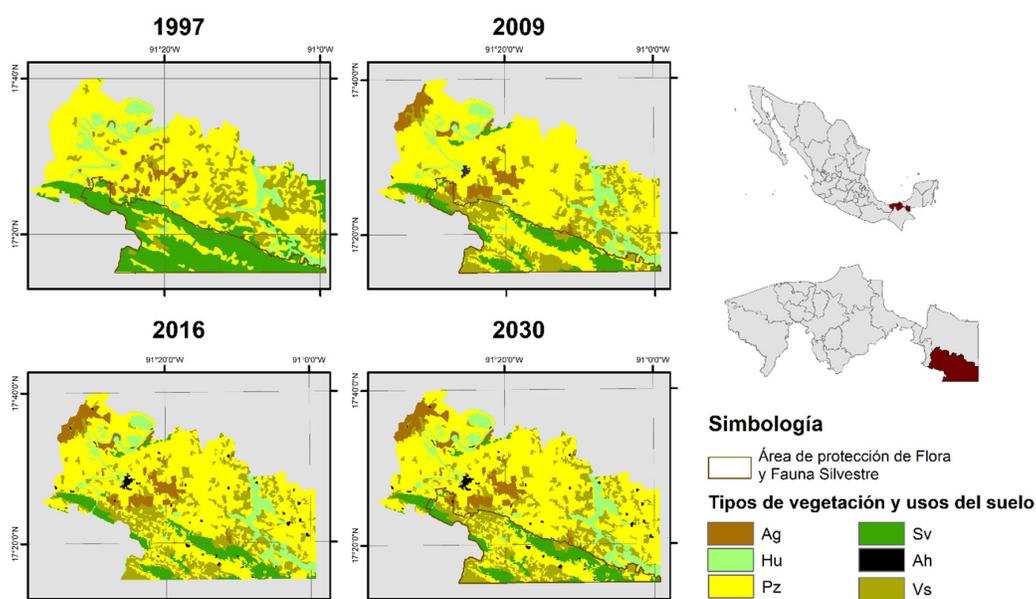
	Sv	Vs	Hu	Ag	Pz	Ah	Pérdidas
	----- ha -----						
Sv		393.8			1230.8		1624.5
Vs		60.8		522.0	7616.3		8199.0
Hu		130.5			261.0		391.5
7Ag		339.8			130.5	54.0	524.3
Pz	438.8	9609.8	360.0	1586.3		1116.0	13 110.8
Ah							-

Selvas = Sv; Vegetación secundaria = Vs; Humedales = Hu; Agricultura = Ag; Pastizal = Pz; Asentamientos humanos = Ah.  
 Tropical forest = Sv; Vegetation secondary = Vs; Wetland = Hu; Agriculture = Ag; Grass = Pz; Human settlements = Ah.

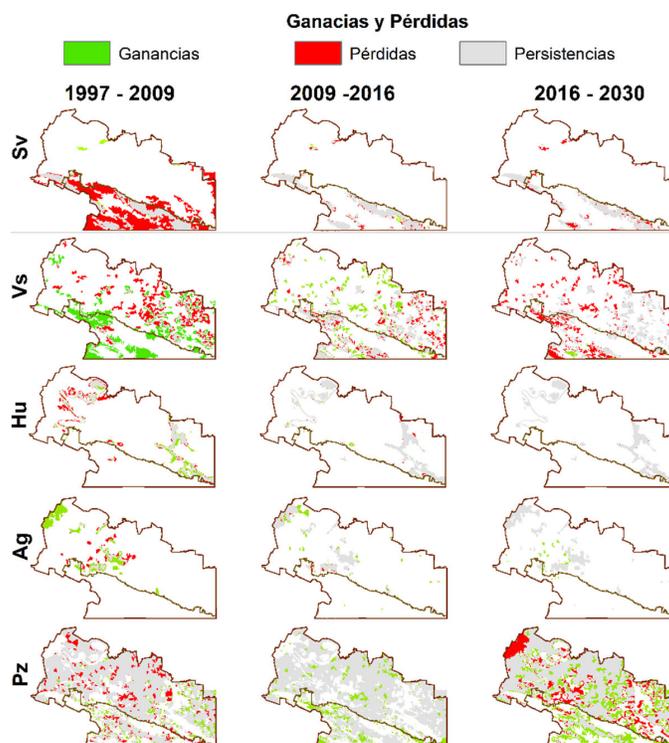
Los resultados obtenidos concuerdan con lo publicado en diversos estudios que señalan a Tabasco como una de las entidades federativas que ha sufrido mayor grado de deforestación en el transcurso del siglo pasado (Capdepon-Ballina y Marín, 2014; Pinkus-Rendón y Contreras-Sánchez, 2012).

Otros autores como Ramírez-García *et al.* (2022) y Sánchez-Munguía (2005) señalan que, para finales del siglo pasado e inicios del presente, las selvas de Tabasco habían perdido más de 90% del territorio. En el caso analizado, el territorio del conjunto de las selvas del municipio paso del 24.7% en 1997 al 8.5% para el 2016 a pesar de que durante el periodo de 97-09 se decretó como Área Natural Protegida la zona serrana de Tenosique (POET, 2005).

Por sus características naturales y por la importancia de sus servicios ambientales las asociaciones naturales como las selvas y los bosques tropicales tienen un valor preponderante (Ceceñas y De León, 2022; Pérez-Irineo y Santos-Moreno, 2013). Este debe ser considerado como prioritario dentro de los programas de conservación, restauración y manejo, especialmente en la zona de Tenosique ante el acelerado decremento de la superficie registrado y el pronóstico poco halagüeño para los próximos años.



**Figura 2. Mapas de usos del suelo y vegetación (1997, 2009, 2016 y 2030).** Selvas (Sv), Vegetación secundaria (Vs), Humedales (Hu), Agricultura (Ag), Pastizal (Pz), Asentamientos humanos (Ah). Elaborado por los autores.  
**Figure 2. Maps of land use and vegetation (1997, 2009, 2016 y 2030).** Tropical forest (Sv), Vegetation secondary (Vs), Wetland (Hu), Agriculture (Ag), Grass (Pz), Human settlements (Ah). (prepared by the authors).



**Figura 3. Pérdidas y ganancias en diferentes tipos de vegetación y usos del suelo para el municipio de Tenosique en los periodos 1997 - 2009, 2009 - 2016 y 2016 - 2030.**

**Figure 3. Losses and gains in different types of vegetation and land uses for the municipality of Tenosique in the periods 1997 - 2009, 2009 - 2016 and 2016 - 2030.**

### Acahuales o Vegetación Secundaria

Un segundo grupo de vegetación silvestre se integró por los acahuales o vegetación secundaria (Galindo-Alcantara *et al.*, 2000<sup>1</sup>). Este es un grupo florístico diverso caracterizado por ser un área en recuperación o sucesión después de haber sido perturbada por factores como incendios, extracción selectiva o actividad agropecuaria entre otras (Zamora-Crescencio *et al.*, 2011). Este grupo de vegetación presentó para 1997 una superficie de 23 000 ha (12.3%), superficie que incrementó para 2009 alcanzando un 42% adicional que equivalen a poco más de 9.9 mil ha con lo que alcanzó una cifra total de 33 000 mil ha (Tc 4.56; Cuadro 1).

De 2009 a 2016 la vegetación secundaria continuo su incremento de superficie pasando de 33 a 35 mil ha, lo que representó un total de 2000 ha netas ganadas en el periodo con una Tc de 0.72 (Cuadro 1). En total para el periodo analizado (1997 - 2016) se registró una Tc de 2.51 con una pérdida de 23 000 ha y una ganancia total de 36 000 quedando una superficie total de 35 000 ha de vegetación secundaria.

Al analizar los cuadros de transiciones se observa que en el periodo 97-09 se perdieron 15 000 ha de acahuales que se transformaron principalmente en pastizales (14 000 ha), en tanto que se ganaron más de 25 000 ha que provienen principalmente de la extracción selectiva de las selvas (15 000 ha) y del abandono de pastizales 9000 ha (Cuadro 2).

En la Figura 3 se observa la distribución de las zonas de vegetación secundaria que se transformaron en el periodo. De esta manera se aprecia el incremento en zonas serranas ante la pérdida o aprovechamiento selectivo de las selvas altas y medianas. En tanto que, para la planicie se observa una distribución generalizada de pérdidas e incrementos de la vegetación secundaria la mayoría de estas transiciones asociadas a la actividad ganadera.

Para el periodo 09-16 sin embargo, se advierte que hubo una pérdida de un poco más de 8 mil ha de acahuales que tienen su origen en la transformación de 7.6 mil ha de pastizales y zonas agrícolas (Cuadro 3). De igual manera, en el mismo periodo se registró un incremento en la vegetación secundaria producto de la conversión de 9.6 mil ha de pastizales y poco más de 800 ha de otros tipos de vegetación (Cuadro 3).

**Cuadro 4. Transiciones registradas para el municipio de Tenosique en el periodo de 1997 a 2016.**  
**Table 4. Transitions recorded for the municipality of Tenosique in the period from 1997 to 2016.**

	Sv	Vs	Hu	Ag	Pz	Ah	Pérdidas
	----- ha -----						
Sv	-	15 941.3	1073.3	321.8	15 318.0	-	32 654.3
Vs	283.5	60.8	364.5	972.0	21 793.5	-	23 474.3
Hu	481.5	596.3	-	177.8	3465.0	4.5	4725.0
Ag	-	465.8	65.3	-	2477.3	54.0	3062.3
Pz	1113.8	18 706.5	2817.0	8302.5	-	1241.5	32 181.3
Ah	-	-	-	-	-	-	-

Selvas = Sv; Vegetación secundaria = Vs; Humedales = Hu; Agricultura = Ag; Pastizal = Pz; Asentamientos humanos = Ah.  
 Tropical forest = Sv; Vegetation secondary = Vs; Wetland = Hu; Agriculture = Ag; Grass = Pz; Human settlements = Ah.

Para la vegetación secundaria en el periodo 97-16 el acumulado de pérdidas es de 23 000 ha de las cuales 92.8% corresponden a crecimiento de los pastizales y 7% restante proviene principalmente del incremento en cultivos agrícolas. En el mismo periodo el incremento en la superficie de vegetación secundaria fue de 39.9 mil ha de las cuales 52% fue resultado del abandono de pastizales y 44% de la transformación de selvas (Cuadro 4).

La dinámica de la vegetación secundaria debe ser considerada como una alternativa de recuperación de espacios para bosques y selvas tropicales, especialmente aquellos que cuentan con un tiempo de sucesión mayor a 15 años. Además, son refugio y alimento para una gran diversidad de especies florísticas y faunísticas (Ceceñas y De León, 2022). Estos espacios también se pueden considerar productivos al proveer a la unidad de producción de elementos como leña, madera y alimento para la población.

## Humedales

La clase humedales comprende todos los cuerpos de agua superficiales como ríos, lagunas y arroyos, así como aquellas zonas cubiertas con vegetación hidrófita. Para 1997 los humedales acumularon un total de 15 000 ha que representaron 8.1% de la superficie municipal. Para el 2009, los humedales disminuyeron su superficie total en 373 ha Tc -0.31 (Cuadro 1). Aunque la diferencia entre ambos años es mínima (373 ha) comparada con el total de la superficie registrada, conviene observar que la superficie perdida fue de 4334 ha y la superficie ganada de 3960. Sumando ambos valores obtenemos un total de 8294 ha de humedales en transición, superficie que representa más del 50% del total de la superficie de humedales registrados para el municipio.

Estas variaciones pueden tener diferentes orígenes. Por ejemplo, la sequía y el desbordamiento de los ríos puede descargar o recargar zonas de humedales disminuyendo o incrementando superficies que no necesariamente coinciden con la imagen previa Otra fuente de estas variaciones son las obras de drenaje hidráulico que se implementan en las zonas de cultivo como (Galindo-Alcantara *et al.*, 2022<sup>3</sup>). La caña de azúcar y la palma de aceite, ambos cultivos son muy populares en la zona. Finalmente, la construcción de caminos también constituye una barrera artificial que interrumpe los flujos hidrológicos modificando así las zonas de escurrimiento y de acumulación del agua (Palomeque *et al.*, 2017b).

Analizando las pérdidas y ganancias para esta clase se observó que de las 4000 ha que cambiaron su uso de suelo, 3.2 mil se transformaron en pastizales y 947 ha en vegetación secundaria (Cuadro 2). Esto significa que estas son zonas bajas de anegamiento temporal que dependiendo de la intensidad de la temporada de lluvias puede permanecer húmedas o secarse por falta de precipitación pluvial. Estas son transformadas mediante quemas agrícolas en pastizales inducidos e incluso en zonas agrícolas bajo el método denominado "marceño" (Mariaca-Méndez, 1996).

En el periodo de 2009 a 2016 la variación en los humedales fue mínima comparada con el periodo anterior. En este se perdieron un total de 391 ha que se transformaron en vegetación secundaria (130 ha) y pastizales 261 ha (Cuadro 3). Sin embargo, en este mismo lapso 360 ha de pastizales se transformaron en humedales por lo que el balance de pérdidas y ganancias para este periodo fue bastante equilibrado. De acuerdo con el Cuadro 1, el cambio neto fue de 15 ha con una Tc de 0.01.

En términos generales la variación de los humedales para el periodo 1997-2016 registro una pérdida de 358 ha, pasando de 15 336 ha a 14 963 por lo que la Tc global en los 19 años analizados fue de -0.14 (Cuadro 1).

## **Vegetación Cultural**

A pesar de la existencia de importantes coberturas naturales, las actividades agropecuarias son las que dominan el territorio. En 1997, la vegetación cultural fue un total de 103 mil ha que representan 54% de la superficie total del municipio. De esta superficie 5200 ha corresponden a actividades agrícolas y representan 5% de la actividad agropecuaria. Los principales cultivos en este año fueron caña de azúcar y cultivos básicos de temporal, así como chile en las zonas serranas. En tanto que, el 95% restante se orientó a la ganadería extensiva de bovinos de doble propósito principalmente.

Para el periodo de 1997 a 2009 la superficie para agricultura presentó un incremento neto de 5000 ha, la mayoría de estas provenientes de pastizales, vegetación secundaria y selvas con una Tc de 8.96% (Cuadro 1).

Por su parte la ganadería incrementó su campo de acción con la adición de 14 mil ha con una tasa del 1.76%. Esta superficie resulta de la diferencia entre la ganancia de 33 000 ha y la pérdida de 19 000 lo que deja un balance positivo al incrementar la superficie neta de pastizal en el periodo 1997-2009.

Para 2016, las actividades agrícolas incrementaron 1.5 mil ha (Tc 1.6), en tanto que los pastizales presentaron una pérdida de 3.8 mil ha Tc 0.39 (Cuadro 1). Al analizar las pérdidas y ganancias se puede observar que el pastizal gana 9000 ha y perdió 13 mil lo que le da esa Tc negativa.

Finalmente, el resultado del análisis del cambio de usos del suelo para el periodo 1997-2016 nos arroja un incremento de 17 mil hectáreas en las actividades agropecuarias con 10.8 mil ha resultado del incremento en pastizales (Tc 0.62) y 6.7 mil ha de agricultura con una (Tc 5).

El análisis de las Tasas de cambio de usos del suelo (Tc) en los periodos analizados arrojaron una de las más altas (Ag) con una Tc de 8.96 para 1997-2009 y una Tc de 5 global 1997-2016, (Cuadro 1). Por su parte, la ganadería presenta Tc's bajas siendo el global de 0.6 para el periodo 1997-2016 (Cuadro 1).

Las actividades culturales dependen en gran medida del mercado y de la importancia social que tiene la producción. Para el caso de Tenosique, se observa que la ganadería bovina es un elemento económico fundamental para el municipio. Sin embargo, a pesar de su importancia económica y social se observa una gran variabilidad espacio - temporal en el área de estudio. Esa variación o itinerancia tiene un fuerte impacto sobre los recursos naturales lo que hace necesario considerar alternativas de ordenamiento territorial más puntuales para evitar su itinerancia espacial y el consiguiente impacto sobre los bosques y selvas que aún persisten en la región.

## **Asentamientos Humanos**

El municipio de Tenosique en términos de su población es relativamente pequeño en el ámbito estatal. Para 1990 su población fue de 47 000 habitantes que corresponden al 3% de la población del estado de Tabasco. Para el año 2000, su población alcanzó los 55 mil habitantes distribuidos en 142 localidades. De estas solo 8 rebasan los 500 habitantes. Su cabecera municipal presentaba 30 mil habitantes (55%) siendo la única localidad considerara urbana.

Estas características se reflejan claramente en la superficie registrada para 1997 donde el análisis mostró una superficie de 280 ha de las cuales 177 pertenecen a la cabecera municipal. El resto se encuentra distribuido entre las restantes localidades lo que nos da una superficie promedio por localidad de menos de una hectárea.

Para 2009, la superficie de asentamientos humanos alcanzo un total de 410 ha lo que representó un crecimiento de 130 ha con una TC de 4.88. Este incremento proviene principalmente de la transformación de pastizales aledaños a los centros de población que se convierten en asentamientos humanos. De acuerdo con el Cuadro 2, la mayor parte de las 130 ha con las que incrementaron los asentamientos humanos provienen de los pastizales.

De 2009 a 2016 el crecimiento en la superficie de asentamientos humanos se triplico alcanzando un total de 1600 ha con una TC para este periodo de 16.39. Al igual que el periodo anterior la superficie que permitió el incremento proviene en su mayoría de 1116 ha de pastizales y el resto de las zonas agrícolas (Cuadro 3).

Para el periodo completo, el análisis permitió registrar un incremento total de 1.3 mil hectáreas por lo que la superficie de asentamientos humanos pasó de 280 a 1.6 mil ha con una Tc global de 10.83.

De esta manera las tasas de cambio más altas registradas en el análisis del periodo de 1997 a 2009 fueron: 11.70% de pérdida en selvas y el incremento de 8.96% en agricultura y 4.88% en asentamientos humanos. En tanto que, para el periodo 2009-2017 la tasa más alta registrada fue de 16.39% en asentamientos humanos. De esta forma, en el periodo global de 1997 a 2016, las Tc con mayor velocidad son pérdidas del 6.06% para las selvas, en tanto que los asentamientos humanos y la agricultura registraron tasas de 10.83 y 5% respectivamente.

En la Cuadro 4 se puede observar el resumen de las transiciones para el periodo 1997-2016. Las pérdidas más significativas son aquellas que se relacionan con los ecosistemas con un mayor grado de naturalidad como lo son las selvas, los humedales y la vegetación secundaria. Estos se ven afectados por las actividades agropecuarias, especialmente por la ganadería extensiva. En total para el periodo analizado se registró una pérdida de 32 000 ha de selvas y 23 000 de vegetación secundaria, en tanto que los pastizales acumularon un crecimiento de 43 000 hectáreas.

### Proyección de Cambio al 2030

De mantenerse la tendencia actual del uso del uso del suelo, el análisis de la proyección de cambio de usos del suelo apunta a la transición de tres elementos dos de ellos importantes para la conservación de los recursos naturales y uno de estos de importancia para la actividad económica del municipio.

La pérdida más significativa esperada para el 2030, es la transformación de casi 3 mil ha con una Tc de 1.4 (Cuadro 5) y aun cuando esta es bastante más baja que la Tc del periodo de 1997 a 2016 (6.06) es ligeramente más alta que el periodo de 2009 a 2016 (0.75). Esto significa que se esperaría una posible aceleración en la transformación de selvas al interior de municipio que serían transformadas principalmente en pastizales.

Por su parte, la vegetación secundaria también tendría cambios importantes para 2030, ya que se estima la pérdida de poco más de 12 000 ha que serían ocupadas principalmente por pastizales. Su importancia radica principalmente en ser tierras en descanso que al entrar en un periodo de sucesión sirven de refugio y alimentación para diversas especies de flora y fauna silvestre, además de reestablecer parte de sus nutrientes para retomar su actividad productiva más adelante.

La categoría con mayor poder de transformación al menos para el municipio de Tenosique es el pastizal, por lo que se esperaría que para 2030 la superficie de pastizal alcance el 65% de la superficie municipal. Esto coincide con la importancia que tiene la ganadería bovina como un referente de estatus económico y social que se ha venido arrastrando en el estado de Tabasco desde el periodo de la ganaderización (Galindo- Alcántara, 1999<sup>4</sup>; Morales-Jiménez, 1990).

**Cuadro 5. Cuantificación del cambio de uso del suelo esperado en Tenosique, Tabasco de 2016 a 2030.**

**Table 5. Quantification of expected land use change in Tenosique, Tabasco from 2016 to 2030.**

Categorías	2016		2030		Pérdidas	Ganancias	Cambio neto	Tc
	ha	%	ha	%				
Sv	16 202	8.55	13 349	7.05	2853	0	-2853	-1.4
Vs	35 406	18.69	22 824 <sup>vv</sup>	12.05	13 291	709	-12 582	-3.1
Hu	14 978	7.90	14 978	7.90	0	0	0	0
Ag	11 918	6.29	11 918	6.29	0	0	0	0
Pz	109 366	57.72	124 801	65.87	0	15 435	15 435	0.9
Ah	1607	0.85	1607	0.85	0	0	0	0

Selvas = Sv; Vegetación secundaria = Vs; Humedales = Hu; Agricultura = Ag; Pastizal = Pz; Asentamientos humanos = Ah.  
Tropical forest = Sv; Vegetation secondary = Vs; Wetland = Hu; Agriculture = Ag; Grass = Pz; Human settlements = Ah.

<sup>4</sup> Galindo-Alcántara, A. (1999). *Conservación de los recursos naturales y ganadería bovina en el estado de Tabasco, México*. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias. El Colegio de la Frontera Sur. Disponible en <https://biblioteca.ecosur.mx/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=20040>

## CONCLUSIONES

El análisis de los datos muestra que el motor del cambio de usos del suelo en el municipio de Tenosique es la ganadería. El impacto de esta actividad se reflejó especialmente en una pérdida acelerada de las selvas tropicales en el municipio especialmente en el periodo de 1997 a 2009. En el segundo periodo la velocidad de la pérdida de selvas disminuye como posible efecto de la declaratoria como área natural protegida de la porción serrana del municipio. De seguir la tendencia actual en las transiciones se espera que para el 2030 la superficie de selvas se reduzca a un más hasta alcanzar un porcentaje menor al diez por ciento con el impacto ambiental correspondiente tanto en la conservación de la biodiversidad como en los servicios ambientales que presta la vegetación silvestre.

A pesar de que la ganadería bovina en el municipio es la actividad económica más importante, el análisis del cambio en el uso del suelo reflejó su inestabilidad espacial durante los periodos analizados. Es decir que la ganadería es el principal motor del cambio de usos del suelo en el municipio de Tenosique ya que aun cuando su superficie total se mantiene con pequeñas variaciones, este equilibrio se sustenta en la conversión de otras zonas como selvas, humedales y acahualas.

Los resultados mostrados son de gran utilidad para que las autoridades federales, estatales y municipales puedan sustentar planes del desarrollo, programas y estrategias de manejo, aprovechamiento sustentable y conservación de los recursos naturales del municipio.

## DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

## CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

## DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los datos utilizados o analizados durante el estudio actual están disponibles del autor correspondiente, a solicitud razonable.

## CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

## FINANCIACIÓN

No aplicable.

## CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: A.G.A. y S.C.R.A. Metodología: S.C.R.A., A.G.A. y M.A.P.C. Software: A.G.A. y M.A.P.C. Validación: A.G.A. Análisis formal: M.A.P.C. y A.G.A. Redacción, preparación del borrador original: M.A.P.C. Redacción, revisión y edición: A.G.A., T.G.N.M., M.A.M.A., R.R.R. y S.C.R.A.

## AGRADECIMIENTOS

No aplicable.

## LITERATURA CITADA

Arreola-Muñoz, A., Reyes-Barrón, M. C., Segura-Bertollini, E. C., Hernández-Zárate, L. O., & López, J. G. (2011). *Ordenamiento territorial de la microrregión cañón del usumacinta municipio Tenosique, Tabasco*. México: Secretaría de Recursos Naturales y Protección Ambiental. ISBN: 9786079576479

- Arriaga, L., Espinoza, J. M., Aguilar, C., Martínez, E., Gómez, L., & Loa, E. (2000). *Regiones terrestres prioritarias de México*. Distrito Federal, México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Camacho-Olmedo, M. T., Molero-Melgarejo, E., & Paegelow, M. (2010). Modelos geomáticos aplicados a la simulación de cambios de usos del suelo. Evaluación del potencial de cambio. En J. Ojeda, M. F. Pita, & I. Vallejo (Eds.). *Tecnologías de la Información Geográfica. La información geográfica al servicio de los ciudadanos* (pp. 658-678). Sevilla, España: Universidad de Sevilla.
- Cámara-Cabrales, L. C., Hernández-Trejo, H., Castillo-Acosta, O., Galindo-Alcántara, A., Morales-Hernández, A., Zequeira-Larios, C., ... & Guadarrama, M. A. (2011). *Estudio Regional de la UMAFOR de los Ríos*. Tabasco, México: CONAFOR.
- Capdepon-Ballina, J. L., & Marín-Olán, P. (2014). La economía de Tabasco y su impacto en el crecimiento urbano de la ciudad de Villahermosa (1960-2010). *LiminaR Estudios Sociales y Humanísticos*, 12(1), 1-17. <https://doi.org/10.29043/liminar.v12i1.330>
- Ceceñas, Y. M., & de León, A. F. (2022). El único e inigualable tepezcuintle: Un pilar de las interacciones en las selvas de México. *Therya Ixmana*, 1(2), 74-76.
- De Koning, G. H. J., Verburg, P. H., Veldkamp, A., & Fresco, L. O. (1999). Multi-scale modelling of land use change dynamics in Ecuador. *Agricultural Systems*, 61(2), 77-93. [https://doi.org/10.1016/S0308-521X\(99\)00039-6](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(99)00039-6)
- Eastman, J. R. (2020). *TerrSet. Version 18.21*. Clark Labs for Cartographic Technology and Geographic Analysis. Worcester, MA, USA: Clark University.
- Eastman, J. R., & Toledano, J. (2018). A Short Presentation of the Land Change Modeler (LCM). En M. T. Camacho Olmedo, M. Paegelow, J. F. Mas., & F. Escobar (Eds.). *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios* (pp. 499-505). Cham, Switzerland: Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-60801-3\\_36](https://doi.org/10.1007/978-3-319-60801-3_36)
- ESRI (2022). *ArcGis User's Guide. Released 10.8*. Redlands, CA, USA: Environmental Systems Research Institute.
- Galicia, L., García-Romero, A., Gómez-Mendoza, L., & Ramírez, M. I. (2007). Cambio de uso del suelo y degradación ambiental. *Ciencia. Revista de la Academia Mexicana de Ciencias*, 58(4), 50-59.
- Gallardo-Cruz, A., de Oca, A. F. M., & Rives, C. (2019). Detección de amenazas y oportunidades para la conservación en la cuenca baja del Usumacinta a partir de técnicas de percepción remota. *Ecosistemas*, 28(2), 82-99. <https://doi.org/10.7818/ECOS.1611>
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Distrito Federal, México: Instituto de Geografía. UNAM.
- Geng, J., Shen, S., Cheng, C., & Dai, K. (2022). A hybrid spatiotemporal convolution-based cellular automata model (ST-CA) for land-use/cover change simulation. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 110, 102789. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102789>
- Haberl, H., Erb, K. H., & Krausmann, F. (2014). Human appropriation of net primary production: patterns, trends, and planetary boundaries. *Annual Review of Environment and Resources*, 39(1), 363-391. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-121912-094620>
- Hasan, S. S., Zhen, L., Miah, M. G., Ahamed, T., & Samie, A. (2020). Impact of land use change on ecosystem services: A review. *Environmental Development*, 34, 100527. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2020.100527>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). (2021). Marco Geoestadístico. Consultado el 22 de febrero, 2023, desde <https://www.inegi.org.mx/temas/mg/>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). (2022). Conjunto de Datos Vectoriales de Uso de Suelo y Vegetación. Escala 1:250,000. Serie VI. Consultado el 22 de febrero, 2023, desde <https://www.inegi.org.mx/temas/usuarios/>
- Isaac-Márquez, R., de Jong, B., Eastmond, A., Ochoa-Gaona, S., Hernández, S., & Kantún, M. D. (2005). Estrategias productivas campesinas: un análisis de los factores condicionantes del uso del suelo en el oriente de Tabasco, México. *Universidad y Ciencia*, 21(42), 57-73.
- Jiménez-Gaspar, B. G., & Lara-Alamilla, J. (2023). Políticas públicas para el desarrollo regional sostenible en tabasco: conservación de ecosistemas y gestión de recursos hídricos. En S. Oswald, S. Eréndira, W. González, P. M. García de Alba, & E. Regina (Coords.). *Estudios de género, geopolítica y dinámicas regionales con inclusión social* (pp. 561-570). México: UNAM-AMECIDER. ISBN: 978-607-30-8316-4
- Liu, H., Zhang, K., Li, Y., & Xie, L. (2013). Numerical study of the sensitivity of mangroves in reducing storm surge and flooding to hurricane characteristics in southern Florida. *Continental Shelf Research*, 64, 51-65.
- Malhi, Y., Franklin, J., Seddon, N., Solan, M., Turner, M. G., Field, C. B., & Knowlton, N. (2020). Climate change and ecosystems: threats, opportunities and solutions. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 375(1794), 20190104. <https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0104>
- Manjarrez-Muñoz, B., Hernández-Daumás, S., De Jong, B., Nahed-Toral, J., Dios-Vallejo, O. O. D., & Salvatierra-Zaba, E. B. (2007). Configuración territorial y perspectivas de ordenamiento de la ganadería bovina en los municipios de Balancán y Tenosique, Tabasco. *Investigaciones Geográficas*, 64, 90-115.
- Mariaca-Méndez, R. (1996). El ciclo marceño en tierras bajas pantanosas de Tabasco: Producción tradicional de maíz altamente eficiente. *Agrociencia*, 30(2), 279-286.
- Molotoks, A., Smith, P., & Dawson, T. P. (2021). Impacts of land use, population, and climate change on global food security. *Food and Energy Security*, 10(1), e261. <https://doi.org/10.1002/fes3.261>
- Morales-Jimenez, C. (1990). La Ganaderización de Tabasco. Reflejo de la ineficiencia e irresponsabilidad empresarial en el aprovechamiento y manejo del trópico húmedo mexicano. *Revista de Difusión Científica Tecnológica y Humanística*, 1(2), 37-42.
- O'Neill, B. C., Carter, T. R., Ebi, K., Harrison, P. A., Kemp-Benedict, E., Kok, K., ... & Pichs-Madruga, R. (2020). Achievements and needs for the climate change scenario framework. *Nature Climate Change*, 10(12), 1074-1084. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00952-0>
- Palma-López, D. J., Vazquez-Navarrete, C. J., Mata-Zayas, E. E., Lopez-Castañeda, A., Morales-Garduza, M. A., Chablé-Pascual, R., ... & Palma-Cancino, D. Y. (2011). Zonificación de Ecosistemas y Agroecosistemas Susceptibles de Recibir Pagos por Servicios Ambientales en la Chontalpa, Tabasco. Gobierno del Estado de Tabasco-Colpos.
- Palomeque-De la Cruz, M. Á., Galindo-Alcántara, A., Sánchez, A. J., & Escalona-Maurice, J. (2017a). Pérdida de humedales y vegetación por urbanización en la cuenca del río Grijalva, México. *Investigaciones Geográficas*, 68, 151-172. <https://doi.org/10.14198/INGEO2017.68.09>
- Palomeque-De la Cruz, M. Á., Galindo-Alcántara, A., Escalona-Maurice, M. J., Ruiz-Acosta, S. del C., Sánchez-Martínez, A. J., & Pérez-Sánchez, E. (2017b). Analysis of land use change in an urban ecosystem in the drainage area of the Grijalva river, Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 23(1), 105-120. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2016.03.018>
- Pérez-Iríneo, G., & Santos-Moreno, A. (2013). Riqueza de especies y gremios tróficos de mamíferos carnívoros en una selva alta del sureste de México. *Therya*, 4(3), 551-564. <https://doi.org/10.12933/therya-13-157>
- Pinkus-Rendón, M. J., & Contreras-Sánchez, A. (2012). Impacto socioambiental de la industria petrolera en Tabasco: El caso de la Chontalpa. *LiminaR Estudios Sociales y Humanísticos*, 10(2), 122-144. <https://doi.org/10.29043/liminar.v10i2.99>
- POET (Periódico Oficial del Estado de Tabasco) (2005). Acuerdo: Parque Estatal Cañón del Usumacinta. Periódico Oficial del Estado de

- Tabasco. México: POET. Consultado el 11 de abril, 2024, desde <http://periodicos.tabasco.gob.mx/media/2005/441.pdf>
- Ramírez-García, A. R., Zavala-Cruz, J., Rincón-Ramírez, J. A., Guerrero-Peña, A., García-López, E., Sánchez-Hernández, R., ... & Ortiz-Pérez, M. A. (2022). Cambio de uso agrícola y vegetación (1947-2019) en la región de Los Ríos, Tabasco, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 28(3), 465-481. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2022.01.001>
- Romero-Rodríguez, J., Aguilar-Ávila, J., Santoyo-Cortés, V. H., & Diakite, L. (2022). Transiciones del cambio de uso de suelo en el estado de Puebla (1980-2016), México. *Investigaciones Geográficas*, 109, 1-17. <https://doi.org/10.14350/rig.60621>
- Sánchez-Munguía, A. (2005). Uso del suelo agropecuario y deforestación en Tabasco, 1950-2000. Tabasco, México: Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. ISBN: 9685748675
- SEGOB (Secretaría de Gobernación). (1992). DECRETO por el que se declara como área natural protegida, con el carácter de reserva de la biosfera, la zona conocida como Pantanos de Centla, con una superficie de 302,706-62-50 hectáreas, ubicadas en los Municipios de Centla, Jonuta y Macuspana, Tabasco. *Diario Oficial de la Federación*. Ciudad de México, México: SEGOB.
- SEGOB (Secretaría de Gobernación). (2008). DECRETO por el que se declara área natural protegida con la categoría de área de protección de flora y fauna, la región conocida como Cañón del Usumacinta, localizada en el Municipio de Tenosique, en el Estado de Tabasco. *Diario Oficial de la Federación*. Ciudad de México, México: SEGOB.
- Siegel, K., Farah-Pérez, A., Kinnebrew, E., Mills-Novoa, M., Ochoa, J., & Shoffner, E. (2022). Integration of qualitative and quantitative methods for land-use-change modeling in a deforestation frontier. *Conservation Biology*, 36(6), e13924. <https://doi.org/10.1111/cobi.13924>
- Soares, D., & García-García, A. (2017). La cuenca del Río Usumacinta desde la perspectiva del cambio climático (1ª ed.). México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. ISBN: 978-607-9368-80-7
- Surya, B., Ahmad, D. N. A., Sakti, H. H., & Sahban, H. (2020). Land use change, spatial interaction, and sustainable development in the metropolitan urban areas, South Sulawesi Province, Indonesia. *Land*, 9(3), 95. <https://doi.org/10.3390/land9030095>
- Torres-Bernardino, L. (2018). Política ambiental en la Cuenca Baja del Río Usumacinta 113 114. En *Las influencias políticas en el medio ambiente en México* (pp. 221-251). México: Instituto Nacional de Administración Pública de México y el Institut de Recherche pour le Développement.
- Tudela, F. (1989). *La modernización forzada del trópico: El caso de Tabasco, proyecto integrado del Golfo*. Ciudad de México: Centro de Estudios Demográficos y de Desarrollo Urbano-Colegio de México. ISBN: 968 12 0419 0
- Veldkamp, A., & Lambin, E. F. (2001). Predicting land-use change. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 85(1), 1-6. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00199-2](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00199-2)
- Vitousek, P. M., Mooney, H. A., Lubchenco, J., & Melillo, J. M. (1997). Human Domination of Earth ' s Ecosystems. *Science*, 277(5325), 494-499. <https://doi.org/10.1126/science.277.5325.494>
- Winkler, K., Fuchs, R., Rounsevell, M., & Herold, M. (2021). Global land use changes are four times greater than previously estimated. *Nature Communications*, 12(1), 2501. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22702-2>
- Xie, S., Zhang, W., Zhao, Y., & Tong, D. (2022). Extracting land use change patterns of rural town settlements with sequence alignment method. *Land*, 11(2), 313. <https://doi.org/10.3390/land11020313>
- Xu, Q., Zhu, A.-X., & Liu, J. (2023). Land-use change modeling with cellular automata using land natural evolution unit. *Catena*, 224, 106998. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.106998>
- Zamora-Crescencio, P., Domínguez-Carrasco, M. D. R., Villegas, P., Gutiérrez-Báez, C., Manzanero-Acevedo, L. A., Ortega-Haas, J. J., ... & Puch-Chávez, R. (2011). Composición florística y estructura de la vegetación secundaria en el norte del estado de Campeche, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 89, 27-35. <https://doi.org/10.17129/botsoci.368>