



Análisis geomático espacial del cambio de uso del suelo en Huimanguillo, Tabasco (2000-2010-2030)

Spatial analysis and geomatics of land use changes in Huimanguillo, Tabasco (2000-2010-2030)

Rodimiro Ramos Reyes¹, Miguel Ángel Palomeque de la Cruz^{2*}, Juan Carlos Núñez¹ y Rufo Sánchez Hernández³

Abstract

The change of land use represents one of the major challenges that sustainability plans face, because it contributes to climate change and biodiversity loss. In view of this, based on the lack of knowledge of the patterns of land use changes and their effects on the ecosystems of *Huimanguillo, Tabasco*, an analysis with Land Change Modeler (2000-2010) was proposed to estimate the distribution of natural covers with greater environmental pressure. Based on this, a projection was built with Markov Chains and Cellular Automata (2030). Thus, during 2000 and 2010, significant gains were detected in wetlands (39 236 ha) and in arboreal vegetation (24 773 ha) that were favorable for the maintenance of ecosystem services. However, there were increases in the urban area (1 266 ha) in the face of the agricultural decline (53 639 ha) which, despite its losses, still represents the largest area in the territory, due to the permanence of productive activities. In addition, the 2010 spatial analysis against the 2030 projection found that trends in wetland growth (7 197 ha), tree vegetation (9 937 ha) and urban use (1 498 ha) continued in the face of agricultural area losses (16 433 ha). This study generated helpful mapping information for determining environmental planning strategies and policies that may lead to the implementation of an ecological regulatory zoning for urban development and to decreeing Protected Natural Areas.

Key words: Protected Natural Areas, Cellular Automata, Markov Chains, Geomatics, Land Change Modeler, Environmental Planning.

Resumen

El cambio de uso del suelo representa uno de los grandes desafíos que se antepone a la sostenibilidad, debido a que contribuye al cambio climático y a la pérdida de biodiversidad. Ante esto, y con base en el desconocimiento de los patrones de cambios de usos del suelo y sus efectos en los ecosistemas de Huimanguillo, Tabasco, se planteó realizar un análisis con *Land Change Modeler* (2000-2010) para estimar la distribución de las coberturas naturales con mayor presión ambiental. A partir de ello se construyó una proyección con Cadenas de *Markov* y Autómatas Celulares (2030). Así, durante 2000 y 2010 se detectaron importantes ganancias en los humedales (39 236 ha) y en la vegetación arbórea (24 773 ha), lo cual es favorable para el mantenimiento de los servicios ecosistémicos. Sin embargo, se registraron aumentos en la zona urbana (1 266 ha) con disminución en la agropecuaria (53 639 ha), aunque esta aún constituye la mayor superficie en el territorio. Además, con el análisis espacial del 2010 contra la proyección 2030, se detectó que continuaron las tendencias de crecimiento de los humedales (7 197 ha), vegetación arbórea (9 937 ha) y uso urbano (1 498 ha); así como la disminución del área agropecuaria (16 433 ha). Este estudio generó información cartográfica útil para la definición de las estrategias y políticas de planificación territorial, que conlleve a la implementación de un modelo de ordenamiento ecológico territorial de desarrollo urbano, y, en su caso, al decreto de áreas naturales protegidas.

Palabras clave: Áreas Naturales Protegidas, Autómatas Celulares, Cadenas de *Markov*, geomática, modelador del cambio de uso del suelo, ordenamiento ecológico territorial.

Fecha de recepción/Reception date: 5 de abril de 2019

Fecha de aceptación/Acceptance date: 12 de junio de 2019

¹El Colegio de la Frontera Sur, *Campus Villahermosa*, Tabasco. México.

²División Académica de Ciencias Biológicas. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

³División Académica de Ciencias Agropecuarias. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

* Autor por correspondencia; correo-e: migueldacbiol@hotmail.com

Introducción

El cambio de uso del suelo representa uno de los grandes desafíos que se antepone a los planes de sostenibilidad actual, debido a que contribuye al cambio climático y a la pérdida de biodiversidad (Mahmood *et al.*, 2010). Los factores que lo impulsan varían a nivel regional y se modifican a través del tiempo (Rudel *et al.*, 2009) por la presencia de fenómenos como el crecimiento poblacional, la globalización y la apertura del mercado de exportación, que podrían modificar el escenario de la conversión de tierras en el futuro (Schmitz *et al.*, 2015).

En México, desde la década de los sesenta, existe una clara tendencia de transformación de los bosques a usos agropecuarios, en los que la agricultura de temporal es la dominante (Rosete-Vergés *et al.*, 2014). Esto es de particular importancia, dado que la conversión de los bosques tropicales a zonas agrícolas y pecuarias representa la eliminación de sumideros de carbono que contribuye al cambio climático global (Zheng *et al.*, 2013). La conversión de tierras en el territorio mexicano, principalmente por deforestación, obedece a causas diferentes según la región, las cuales están ligadas más directamente a factores ambientales, socioeconómicos y a las políticas públicas (Maser, 1996).

En Tabasco, el cambio de uso del suelo ha sido drástico en términos de deforestación; Tudela (1992) señala que en 50 años se perdió casi la totalidad de la cobertura selvática existente en el estado. Hacia los años sesenta, la declaratoria federal para producir grandes cantidades de granos básicos, origen del Plan Chontalpa, misma que apoyada con el *boom* petrolero estimuló la economía mediante la construcción de infraestructura y el consecuente crecimiento poblacional que favoreció la creación de grandes centros urbanos, como Cárdenas, Huimanguillo, Comalcalco, Centla, Paraíso y Macuspana (Pinkus-Rendón y Contreras-Sánchez, 2012).

Hoy en día, esos efectos son más visibles puesto que el estímulo macroeconómico a través de la demanda de productos agrícolas y pecuarias comerciales ha propiciado el incremento de sus precios en el mercado nacional e internacional, lo que, a su vez,

favorece la conversión de las coberturas vegetales en grandes áreas agropecuarias. Tal es el caso del municipio de Huimanguillo, donde la citricultura, la ganadería y las plantaciones forestales (eucalipto, hule y palma de aceite) han aumentado su extensión en las últimas décadas (Palma-López *et al.*, 2011). Sin duda alguna, la modificación de las tierras de Tabasco ha sido impulsada, en mayor medida, por la búsqueda del crecimiento económico, como históricamente ha ocurrido en los países en vías de desarrollo (Dewan y Yamaguchi, 2009).

El estudio del cambio de uso del suelo está en el centro de atención de la investigación ambiental, ya que es primordial para la evaluación del impacto ambiental, para predecir escenarios ambientales, socioeconómicos y para establecer políticas de planificación territorial (Paegelow *et al.*, 2003). En lo que se refiere a los usos actuales del suelo en el municipio Huimanguillo, Tabasco prevalecen los siguientes cuestionamientos: ¿Los cambios de usos del suelo son favorables al ambiente? o ¿generan conflicto de intereses?; por ello, se planteó el objetivo de realizar un análisis geomático espacial del cambio de uso del suelo mediante la herramienta *Land Change Modeler* (2000-2010), para estimar la distribución de las coberturas naturales sujetas a mayor presión ambiental por la presencia de los usos antrópicos; y a partir de ello, construir un escenario futuro (2030) basado en Cadenas de *Markov* y Autómatas Celulares.

Materiales y Métodos

Área de estudio

El municipio de Huimanguillo, Tabasco (Figura 1) se localiza en la cuenca del río Tonalá, México. El territorio pertenece a la región de la Chontalpa y tiene como cabecera municipal a la ciudad del mismo nombre, que se ubica al este de la entidad, entre los paralelos 17°49' de latitud norte y 93°23' de longitud oeste. Colinda al norte con el municipio Cárdenas, al sur con los estados de Chiapas y Veracruz; al este con Chiapas,

delimitado por el río Mezcalapa; y al oeste con Veracruz, cuyo límite es el río Tonalá La extensión territorial del municipio es de 372.792 ha (Periódico Oficial, 2016).



Figura 1. Localización geográfica del área de estudio.

Base de datos geográficos

Se emplearon dos *shapefile* de uso del suelo del 2000 y 2010, *Datum* WGS84-Proyección UTM zona 15N, elaborados mediante digitalización en pantalla (Ordoñez y Martínez-Alegría, 2003); el correspondiente al 2000 se generó con imagen de satélite *LANDSAT 5 TM (Thematic Mapper)* del mismo año, con un despliegue del falso color (RGB 4,3,2); mientras que el del 2010 se creó con imagen *SPOT*, con un falso color (RGB 1, 2, 3) (Ramos-Reyes *et al.*, 2016); se usaron los programas *Quantum GIS*[®] y *Arc GIS 10.5*[®]; la verificación en campo se hizo con equipo GPS. Posteriormente, los vectores fueron transformados a formato *raster* con un tamaño de pixel de 50 metros, mediante el programa *IDRISI Selva*[®]. Las categorías temáticas fueron: 1) humedales (lagunas continentales y costeras, vegetación hidrófila y manglares); 2) arbórea (selva alta perennifolia, acahuales y plantaciones forestales); 3) agropecuario (áreas de pastizal de uso pecuario y cultivos agrícolas); y 4) urbano (asentamientos humanos y carreteras).

Modelación de cambio de uso de suelo (2000-2010)

El módulo empleado fue el *Land Change Modeler (LCM)* de *IDRISI Selva*[®], debido a que está orientado al constante problema de la conversión acelerada del terreno y a las necesidades analíticas de la conservación de la biodiversidad; integra tanto el análisis de los datos, como la noción de cambios de usos del suelo y la predicción de escenarios (Eastman, 2012). También se empleó el módulo *CrossTab* de *IDRISI Selva*[®] para generar una matriz de probabilidades de cambio (2000-2010) que calculó un estadístico *Kappa* = 0.795. De acuerdo con Eastman (2012) los valores de *Kappa* cercanos a 1 demuestran un análisis aceptable y confiable de la dinámica espacial del territorio. Los resultados de *Land Change Modeler (LCM)* (2000-2010) incluyen un resumen que muestra la superficie de cada categoría en términos de persistencias, ganancias, pérdidas y contribuciones entre categorías.

Tasas de cambio

Las tasas de cambio de uso del suelo se estimaron con la fórmula de Palacio-Prieto *et al.* (2004):

$$Td = [(S2 / S1) (1 / n) - 1] * 100$$

Donde:

Td = Tasa de cambio anual (%)

$S1$ = Área cubierta al inicio del periodo (ha)

$S2$ = Área cubierta al final del periodo (ha)

n = Número de años del periodo

Proyección del uso de suelo (2030)

Las Cadenas de *Markov* simulan la predicción del estado de un sistema en un tiempo determinado, a partir de dos estados precedentes (Eastman, 2012). Es un procedimiento discreto en un tiempo discreto, en el cual el valor en el tiempo t_1 depende de los valores en los tiempos t_0 y $t-1$. La predicción se materializa en una serie de mapas de usos del suelo para un tiempo futuro, en donde el nivel digital de cada pixel expresa la probabilidad de pertenecer al uso analizado (Eastman, 2012).

Los Autómatas Celulares funcionan como un conjunto de elementos idénticos, denominado células, cada una de las cuales se encuentra en un espacio discreto (Clarke y Gaydos, 1998). Los mismos autores mencionan que dichas unidades espaciales contienen una historia y una evolución de cambio en el tiempo, además de reglas como la influencia de las celdas colindantes a una celda central.

Las Cadenas de *Markov* se utilizaron para calcular la probabilidad de cambio de un pixel a otro y para generar una matriz de probabilidad de transición (Eastman, 2012). Para ello, se emplearon los mapas de uso de suelo de 2000 y 2010, y se ejecutó el módulo *Markov* del *software* IDRISI Selva[®], se consideró un intervalo de 20 años (2030). Los resultados

fueron: 1) una matriz de probabilidades de transición, 2) una matriz de áreas de transición, y 3) una colección de imágenes que representan las probabilidades de transición para cada una de las cuatro categorías de uso del suelo consideradas (2030).

Posteriormente, el mapa de usos del suelo de 2010, la matriz de probabilidades de transición (2030) y la colección de imágenes de probabilidades de transición (2030) generados, se combinaron mediante el módulo de Autómatas Celulares (*CA-Markov*) del *software* IDRISI Selva[®] (Eastman, 2012) para obtener el mapa de la proyección 2030. La idoneidad del modelo se evaluó a través de una comparación de similitud entre la imagen de 2010 y el mapa proyectado de 2030, para lo cual se utilizó el módulo *VALIDATE* (Eastman, 2012). El estadístico *Kappa* indicó que los valores de *K Estándar* (0.9574), *Kno* (0.9693) y *Klocalition* (0.9837) fueron cercanos a 1; es decir, son precisos para la construcción de escenarios (Eastman, 2012; Ahmed *et al.*, 2013).

Cambio de uso de suelo (2010-2030)

La imagen del 2010 se traslapó con la proyección del 2030 (*CA-Markov*) mediante los módulos *Land Change Modeler* y *CrossTab* para obtener las matrices de cambio y el estadístico *Kappa* (0.9574) que fue cercano a 1; por lo tanto, es aceptable y confiable de la dinámica espacial del territorio (Eastman, 2012). De este modo, se calcularon persistencias, ganancias, pérdidas, contribuciones entre categorías y tasas de cambio para el periodo 2010-2030.

Resultados y Discusión

Cambio de uso del suelo 2000-2010

Land Change Modeler demostró que durante 2000-2010 el uso del suelo con mayor persistencia fue el agropecuario (83.0 %), seguido por los humedales (11.5 %), la vegetación arbórea (5.0 %) y la zona urbana (0.6 %) (Cuadro 1; Figura 2).

Las ganancias de superficie en los humedales (39 236 ha) y en la vegetación arbórea (24 773 ha) superaron las pérdidas y presentaron tasas de aumento de 0.5 % y 4.0 %, respectivamente (Cuadro 1). Estas ganancias, en conjunto, son muy favorables para el mantenimiento de los servicios ecosistémicos en el área de estudio, como la provisión de agua y alimento, el mantenimiento de la biodiversidad, regulación del clima y de las inundaciones, así como la protección de la costa (Kandus *et al.*, 2010; Balvanera, 2012).

Cuadro 1. Cuantificación del cambio de uso del suelo 2000-2010 (LCM).

Categorías	2000 (ha)	%	2010 (ha)	%	Ganancias (ha)	%	Pérdidas (ha)	%	Persistencias (ha)	%	Tc (%)
Hum	66 627	17.9	70 303	18.9	39 236	4.5	35 560	4.1	31 066	11.5	0.5
Arb	25 983	7.0	38 326	10.3	24 773	2.8	12 430	1.4	13 553	5.0	4.0
Agr	278 690	74.8	261 405	70.1	36 354	4.1	53 639	6.1	225 052	83.0	-0.6
Urb	1 492	0.4	2 758	0.7	1 266	0.2	0	0.0	1 492	0.6	6.3

Hum = Humedales; Arb =Arbórea; Agr = Agropecuario; Urb = Urbano.

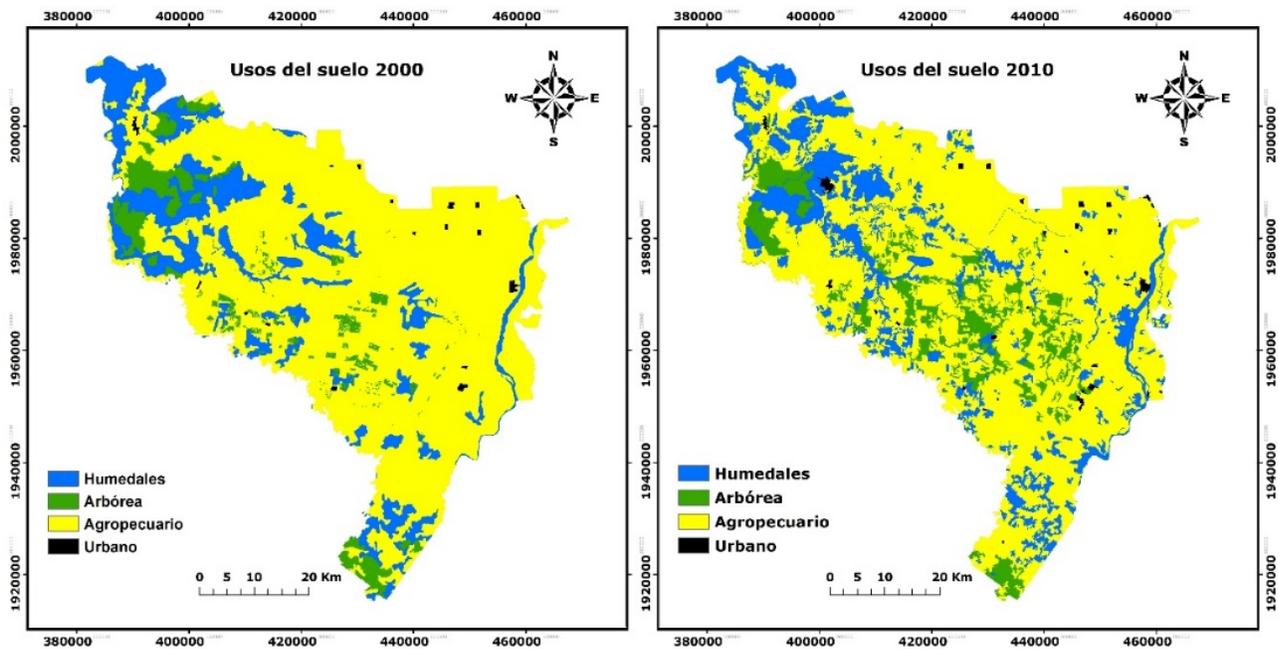


Figura 2. Mapas de usos del suelo del 2000 y 2010.

Cabe destacar que las categorías que contribuyeron con el aumento de los humedales fueron, en primer lugar, el área agropecuaria con 3 744 ha, seguido por la vegetación arbórea con 191 ha; el incremento de esta última responde a su regeneración, principalmente, en 12 609 ha cuyo uso previo era el agropecuario (Figura 3).

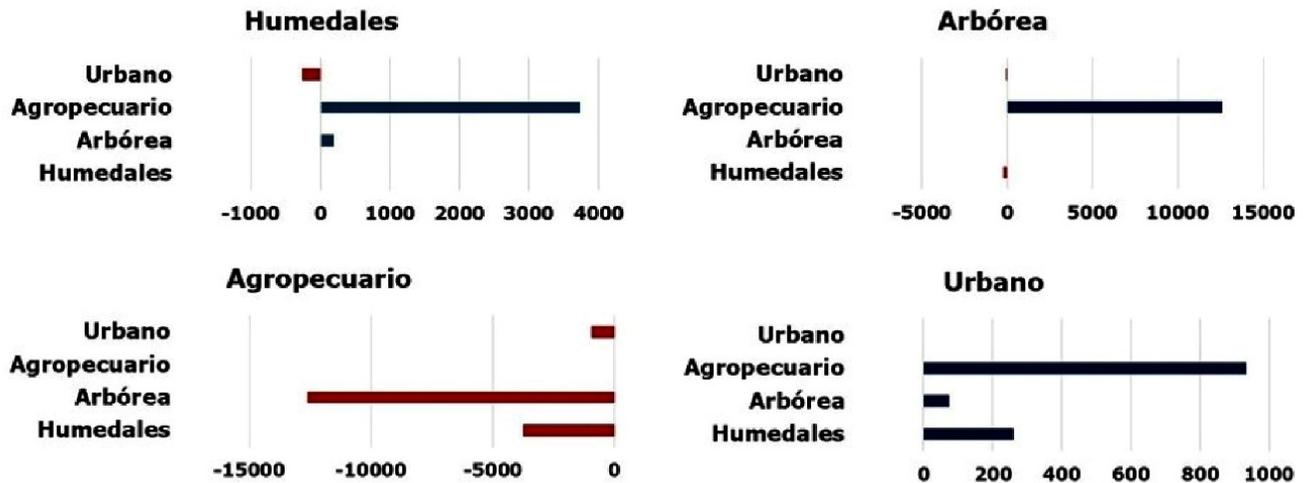


Figura 3. Contribuciones entre categorías 2000-2010.

El aumento de los humedales se relaciona con crecimientos similares en la costa de Tabasco; por ejemplo, durante 1990 y 2000 en la Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla, el manglar registró una superficie de 808 ha (Guerra-Martínez y Ochoa-Gaona, 2006). La conservación de este tipo de vegetación es muy importante en las costas mexicanas, por los servicios ecológicos y económicos que proveen: el desarrollo de especies acuáticas, comercio de madera para la construcción de viviendas y son fuentes de combustible (Yáñez-Arancibia *et al.*, 2014).

Sin embargo, a pesar de las ganancias en los humedales (Cuadro 1), Landgrave y Moreno-Casasola *et al.* (2012) detectaron que en Tabasco de 1979 a 2008 se perdieron alrededor de 912 942 ha de manglares, equivalente a 60 % del territorio estatal. En el ámbito nacional, el cambio de uso del suelo en los humedales ha provocado el deterioro y pérdida de servicios ecosistémicos como la prevención de la erosión del suelo y las

playas, del hábitat para la fauna silvestre; así como de, la protección de la línea de costa ante tormentas, lo cual ha favorecido que el oleaje provoque inundaciones y esto incida en las actividades recreativas (Hirales-Cota *et al.*, 2010).

Las ganancias en la vegetación arbórea (Cuadro 1) significan la existencia de un proceso de regeneración natural e inducido, en el que se incluyen a los acahuales y zonas reforestadas para el aprovechamiento forestal. Esto es, debido a que una de las estrategias de conservación, restauración y fomento de los últimos espacios de selva en Huimanguillo ha sido el pago de servicios ambientales, que tuvo efectos benéficos en la regeneración de la selva y en la economía de los productores (Alejandro-Montiel *et al.*, 2010).

Programas como Proárbol impulsaron la conservación de los bosques del sureste de México, y han sido exitosos en zonas rurales de Huimanguillo. En Tabasco, principalmente en la región Chontalpa, se llevaron a cabo programas forestales federales y estatales durante el periodo 2000-2006 (Alejandro-Montiel *et al.*, 2010), posterior a ese sexenio, el Programa Estatal de Reforestación (Proere) reforzó los programas de reforestación y con ello se logró la recuperación de 7 500 ha, superficie similar a la máxima histórica de 8 000 ha que se reforestaron en 1994; lo anterior evidencia que después del 2000 se ha impulsado la actividad forestal en el estado (Alejandro-Montiel *et al.*, 2010). Las plantaciones forestales, también, fueron beneficiadas con esos programas, ya que de 1994 a 2005 se plantó una superficie de 52 169 ha. Sin embargo, a pesar del éxito registrado en ese periodo de reforestación, actualmente las tasas de regeneración son insuficientes, puesto que las pérdidas de selva en Huimanguillo son mayores que las reforestaciones anuales (Alejandro-Montiel *et al.*, 2010).

La superficie agropecuaria presentó grandes pérdidas (53 639 ha) con una tasa de cambio negativa de 0.6 % (Cuadro 1). Además de contribuir para el crecimiento de los humedales y de grandes superficies de la vegetación arbórea, una tercera causa de la disminución del uso agropecuario fue el crecimiento del área urbana (932 ha) (Figura 3).

La zona urbana presentó ganancias importantes (1 266 ha) con una tasa anual de crecimiento de 6.3 % (Cuadro 1). Su elevado crecimiento también fue a expensas de los humedales (260 ha) y de la vegetación arbórea (75 ha) (Figura 3); además, ocurrió en las inmediaciones de las ciudades consolidadas con anterioridad y en la cercanía a las carreteras, donde se han construido zonas residenciales (Periódico Oficial, 2016).

El análisis con *LCM* definió las categorías de cobertura del suelo que contribuyeron en la pérdida o ganancias de otras categorías (Figura 3). No obstante, hay que considerar la existencia de variables que influyen en la dinámica de cada categoría de uso del suelo. Por ejemplo, las variables físicas (pendiente, relieve, orientaciones, etcétera); socioeconómicos (densidad de población, distancia a carreteras, distancias a zonas residenciales, centros comerciales y fábricas); ambientales (áreas naturales protegidas, humedales, tipo de suelo etcétera) (Pontius, 2000; Pagelow *et al.*, 2003; Palomeque-de la Cruz *et al.*, 2017).

El desarrollo de los municipios en México debe considerar una planeación ambiental que incluya la declaración legal de áreas naturales protegidas, tierras de trabajo para los pobladores y vivienda construida en zonas no vulnerables (Benítez *et al.*, 2012). En Tabasco, el Programa de Ordenamiento Ecológico (Poet) (Galindo *et al.*, 2006) tiene como uno de sus objetivos: "Orientar y evaluar el establecimiento y desarrollo de las actividades productivas, los asentamientos humanos y la conservación de los recursos naturales, regulando y disminuyendo los impactos ambientales".

En respuesta a este programa, en el municipio Huimanguillo se tiene que implementar en el corto plazo el decreto de áreas naturales protegidas en el noreste y suroeste, para regular el uso del suelo en: la selva alta perennifolia, los manglares, la vegetación hidrófila y en los acahuales (Figura 4); ya que en el presente estudio para esas coberturas se registraron grandes persistencias y ganancias. Sin embargo, la aplicación de las leyes y de los programas de manejo y la urbanización en el país han sido insuficientes, por lo que el crecimiento y desarrollo de los municipios mexicanos representan amenazas para la conservación de la biodiversidad y el bienestar humano (Bazant, 2010; MacGregor-Forsy y Ortega-Álvarez, 2013).

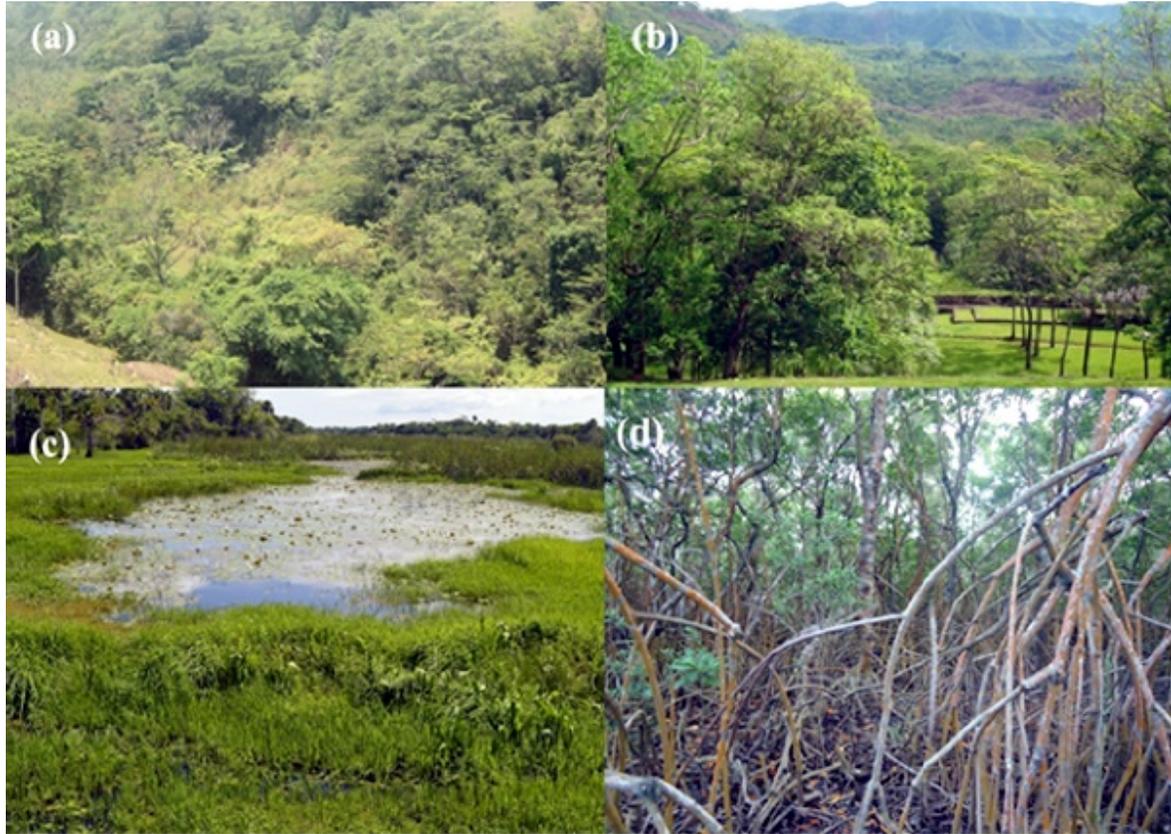


Figura 4. Vegetación de Huimanguillo, Tabasco, de importancia para la conservación a) Selva, b) Acahuals, c) Vegetación hidrófila, y d) Manglares.

Al respecto, en el municipio hay que resolver la problemática de los asentamientos irregulares en zonas de alto riesgo a inundaciones y otros fenómenos naturales. Asimismo, es necesario detener el crecimiento anárquico de fraccionamientos y condominios, que generaron el acelerado cambio de uso del suelo registrado (Periódico Oficial, 2016).

Entre las áreas prioritarias que requieren de un desarrollo urbano planificado, destacan la cabecera municipal, Ciudad de Villa la Venta, Villa Chontalpa (Periódico Oficial, 2016). Es primordial la elaboración de un plan municipal de ordenamiento territorial (PMOT) que contribuya a un desarrollo sostenible; de la misma forma, es indispensable tener en el corto plazo el Programa Municipal de Desarrollo Urbano (PMDU), en el cual se señalen las orientaciones del desarrollo urbano en el que se

definan los usos de suelo e identifiquen los espacios naturales y agrícolas por preservar y se precisen los proyectos urbanos estratégicos para el municipio (Periódico Oficial, 2016).

Proyección espacial del uso del suelo (2030)

La modelación con Cadenas de *Markov* generó una matriz de probabilidades de transición (2030) que mostró a las cuatro categorías de uso del suelo con probabilidades de presentar transiciones notables de superficie en 2030, con respecto al 2010 (Cuadro 2). Esto debido a que la modelación con Cadenas de *Markov* es de tipo lineal y no considera la influencia de factores externos sobre el cambio de uso de suelo (Pontius, 2000; Reynoso *et al.*, 2016), sino que se basa únicamente en la dinámica interna del sistema (Paegelow *et al.*, 2003; Reynoso *et al.*, 2016). Dicha matriz combinada con el modelo de Autómatas Celulares (*CA-Markov*) sirvió de base para la creación de la proyección espacial 2030 (Figura 5).

Cuadro 2. Matriz de probabilidades de cambios 2030 (*Markov*).

	Hum	Arb	Agr	Urb
Hum	0.2899	0.1145	0.5873	0.0084
Arb	0.2527	0.3084	0.4321	0.0068
Agr	0.1679	0.1012	0.7232	0.0077
Urb	0.0976	0.0375	0.0644	0.5006

Hum = Humedales; Arb = Arbórea; Agr = Agropecuario; Urb = Urbano.

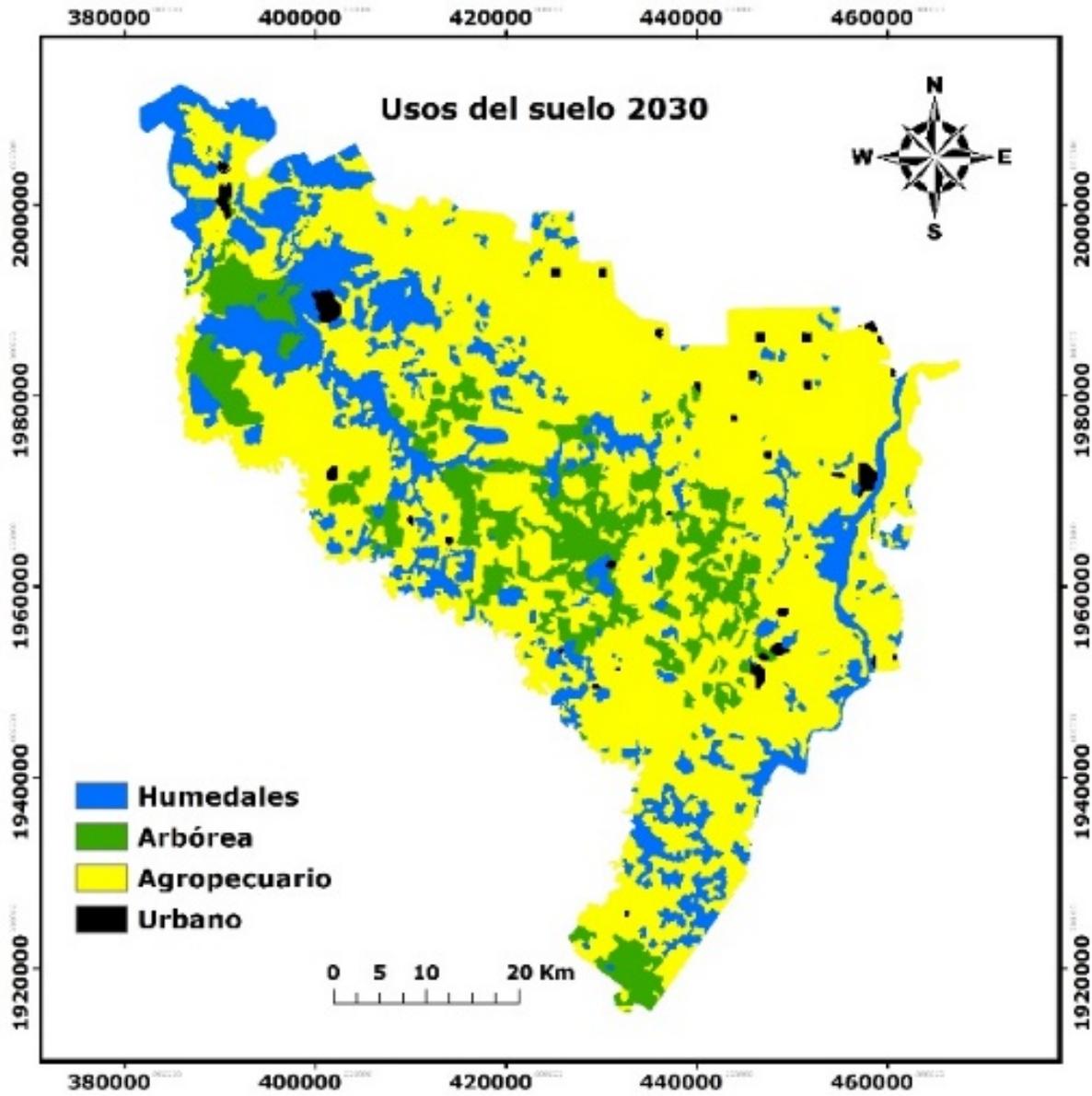


Figura 5. Proyección de los usos del suelo 2030 (Ca-Markov).

Cambio de uso del suelo 2010-2030

A partir del análisis *LCM* (2010-2030) se detectaron ganancias en las coberturas de humedales (7 197 ha), vegetación arbórea (9 937 ha) y zona urbana (1 498 ha) (Cuadro 3); las cuales también se evidenciaron en sus tasas de cambio (Cuadro 3).

Cuadro 3. Cuantificación del cambio de uso del suelo 2010-2030 (*LCM*).

Categorías	2010 (ha)	%	2030 (ha)	%	Ganancias (ha)	%	Pérdidas (ha)	%	Persistencias (ha)	%	Tc (%)
Hum	70 303	18.9	74 213	19.9	7 197	0.8	3 286	0.4	67 016	7.8	0.3
Arb	38 326	10.3	46 428	12.5	9 937	1.1	1 835	0.2	542 478	63.3	1.0
Agr	261 405	70.1	247 895	66.5	2 922	0.3	16 433	1.9	244 973	28.6	-0.3
Urb	2 758	0.7	4 256	1.1	1 498	0.2	0	0.0	2 758	0.3	2.2

Hum = Humedales; Arb = Arbórea; Agr = Agropecuario; Urb = Urbano.

Las categorías que contribuyeron con el aumento de los humedales fueron en primer lugar el área agropecuaria con 2 625 ha; seguida por la vegetación arbórea, con 1 618 ha (Figura 6), cuyo elevado crecimiento fue a expensas de 9 857 ha de superficie agropecuaria (Figura 6). El uso agropecuario perdió, en conjunto, grandes superficies (13 510 ha). Por el crecimiento del área urbana, los humedales y la vegetación arbórea (Figura 6). La zona urbana creció, fundamentalmente, sobre grandes superficies agropecuarias (1 028 ha), de 333 ha de humedales y 137 ha de vegetación arbórea (Figura 6).

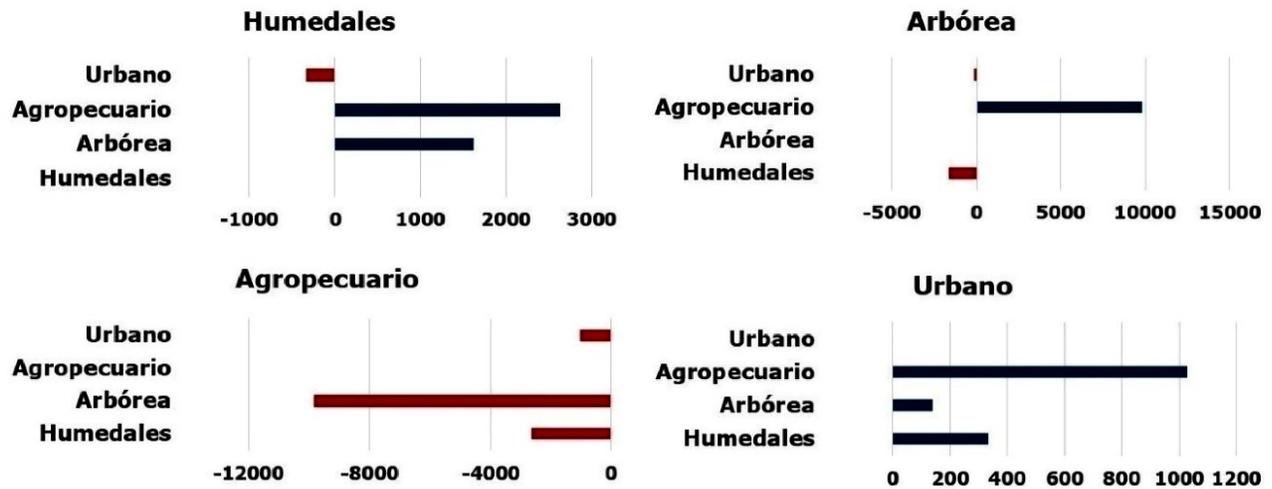


Figura 6. Contribuciones entre categorías 2010-2030.

Con base en las Cadenas de *Markov* y los Autómatas Celulares se detectaron la distribución de las coberturas naturales y los usos artificiales, así como las probabilidades y la proyección espacial del cambio de uso del suelo para el año 2030. La información cartográfica generada es primordial para la creación de futuros proyectos de planificación ambiental, con respecto a los posibles escenarios de cambio de uso del suelo, para evitar las políticas de desarrollo mal planificado para el municipio Huimanguillo.

Es necesario el uso de modelos espaciales del cambio de uso del suelo para que las autoridades y planificadores del suelo comprendan el alcance de los cambios y los riesgos que ello implica. Además, las modificaciones registradas permiten identificar los factores que las están causando, por lo que son útiles para dar seguimiento al ordenamiento ecológico territorial (Jiménez-Moreno *et al.*, 2011).

Conclusiones

Land Change Modeler (LCM) Cadenas de *Markov* y Autómatas Celulares detectan con gran precisión el cambio de uso de suelo durante el periodo 2000-2010, las probabilidades y la proyección espacial del 2030 en el municipio Huimanguillo, Tabasco. Se registran importantes ganancias de las coberturas naturales en conjunto (64 009 ha), lo cual es muy favorable para el mantenimiento de los servicios ecosistémicos. También, destaca que el crecimiento de los ecosistemas, ante aumentos de la zona urbana y pérdidas del área agropecuaria continuará en el 2030. Este estudio resalta la importancia de la elaboración de un plan municipal de ordenamiento territorial (PMOT) que busque contribuir a un desarrollo sostenible; de la misma forma, es necesario elaborar en el corto plazo un Programa Municipal de Desarrollo Urbano (PMDU) y orientar el establecimiento de los usos de suelo, y al mismo tiempo decretar áreas naturales protegidas en el noreste y suroeste del municipio, para regular el uso del suelo, y contribuir a la conservación de la selva alta perennifolia, de los manglares, la vegetación hidrófila y los acahuales que aún persisten.

Agradecimientos

Al Colegio de Postgraduados *campus* Montecillo por la capacitación brindada sobre modelos geomáticos.

Conflicto de intereses

Los autores manifiestan que no existe conflicto de intereses.

Contribución por autor

Rodimiro Ramos Reyes, Juan Carlos Núñez y Rufo Sánchez Hernández realizaron la digitalización de vectores con *Quantum GIS*[®] y *Arc GIS 10.5*[®], así como los trabajos de campo, toma de fotografías y manuscrito; Miguel Ángel Palomeque de la Cruz ejecutó los modelos geomáticos de cambio de uso del suelo con Idrisi Selva y participó en el manuscrito.

Referencias

- Alejandro-Montiel, C., Á. Galmiche-Tejeda, M. Domínguez-Domínguez y A. Rincón-Ramírez. 2010. Cambios en la cubierta forestal del área ecoturística de la Reserva ecológica de Agua Selva, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 12(3): 605-617.
- Ahmed, B., R. Ahmed and X. Zhu. 2013. Evaluation of model validation techniques in land cover dynamics. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 2(3): 577-597. <https://doi.org/10.3390/ijgi2030577>.
- Balvanera, P. 2012. Los servicios ecosistémicos que ofrecen los bosques tropicales. *Revista Ecosistemas* 21(1-2):136-147.
- Bazant, J. 2010. Expansión urbana incontrolada y paradigmas de la planeación urbana. *Espacio abierto* 19(3):475-503.
- Benítez, G., A. Pérez-Vázquez, M. Nava-Tablada, M. Equihua and J. L. Álvarez-Palacios, J. L. 2012. Urban expansion and the environmental effects of informal settlements on the outskirts of Xalapa city, Veracruz, Mexico. *Environment and Urbanization* 24(1): 149-166. <https://doi.org/10.1177/0956247812437520>.

- Clarke, K. C. and L. J. Gaydos. 1998. Loose-coupling a cellular automaton model and GIS: long-term urban growth prediction for San Francisco and Washington/Baltimore. *International Journal of Geographical Information Science* 12(7):699-714. <https://doi.org/10.1080/136588198241617>.
- Dewan, A. M. and Y. Yamaguchi. 2009. Land use and land cover change in Greater Dhaka, Bangladesh: Using remote sensing to promote sustainable urbanization. *Applied Geography* 29(3): 390-401. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2008.12.005>.
- Eastman, J. R. 2012. IDRISI Selva GIS and image processing software version 17.0. Clark Labs. Worcester, MA USA. 321 p.
- Galindo A., A., M. Gama L., A. Salcedo M., S. D. Ruiz A., A. Morales y C. Rullán. 2006. Programa de ordenamiento ecológico del estado de Tabasco. Secretaría de Desarrollo Social y Protección al Ambiente. Villahermosa, Tabs., México. 44 p.
- Guerra-Martínez, V. y S. Ochoa-Gaona. 2006. Evaluación espaciotemporal de la vegetación y uso del suelo en la Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla, Tabasco (1990-2000). *Investigaciones geográficas* (59):7-25.
- Hirales-Cota, M., J. Espinoza-Avalos, B. Schmook, A. Ruiz-Luna y R. Ramos-Reyes. 2010. Agentes de deforestación de manglar en Mahahual-Xcalak, Quintana Roo, sureste de México. *Ciencias marinas* 36(2):147-159. <https://doi.org/10.7773/cm.v36i2.1653>.
- Jiménez-Moreno, M. J., M. J. González-Guillén, M. Escalona-Maurice, J. R. Valdez-Lazalde y C. A. Aguirre-Salado. 2011. Comparación de métodos espaciales para detectar cambios en el uso del suelo urbano. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 17(3):389-406. doi: 10.5154./r.rchscfa.2010.04.020.
- Kandus, P., N. Morandeira y F. Schivo. 2010. Bienes y servicios ecosistémicos de los humedales del Delta del Paraná. Wetlands International-Fundación Humedales. Buenos Aires, Argentina. 32 p.

Landgave, R. y P. Moreno-Casasola. 2012. Evaluación cuantitativa de la pérdida de humedales en México. *Investigación Ambiental* 4(1):19-35.

MacGregor-Forsy, I. y R. Ortega-Álvarez. 2013. *Ecología urbana: experiencias en América Latina*. INECOL. México, D.F., México. 126 p.

Mahmood, R., R. A. Pielke, K. G. Hubbard, D. Niyogi, G. Bonan, P. Lawrence, R. McNider, C. McAlpines, A. Etter, S. Gameda, B. Qian, A. Carleton, A. Beltran-Przekurat, T. Chase, A. I. Quintanar, J. O Adegoke, S. Vezhapparambu, G. Conner, S. Asefi, E. Sertel, D. R. Legates, Y. Wu, R. Hale, O. W. Frauenfeld, A. Watts, M. Shepherd, C. Mitra, V. G. Anantharaj, S. Fall, R. Lund, A. Treviño, P. Blanken, J. Du, H.-I. Chang, R. Leeper, U. S. Nair, S. Dobler, R. Deo and J. Syktus. 2010. Impacts of land use/land cover change on climate and future research priorities. *Bulletin of the American Meteorological Society* 91(1):37-46.

<https://doi.org/10.1175/2009BAMS2769.1>.

Masera, O. 1996. *Deforestación y degradación forestal en México: Estado actual y perspectivas a largo plazo*. Grupo interdisciplinario de tecnología rural apropiada. México, D.F., México. 52 p.

Ordoñez G., C. y L. R. Martínez-Alegría. 2003. *Sistemas de Información Geográfica*. Alfaomega. México, D.F., México. 227 p.

Paegelow, M., M. T. Camacho O. y J. Menor T. 2003. Cadenas de Markov, evaluación multicriterio y evaluación multiobjetivo para la modelización prospectiva del paisaje. *GeoFocus. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica* 3: 22-44.

Palacio-Prieto, J. L., M. T. Sánchez-Salazar, J. M. Casado, F. E. Propin, C. J. Delgado, M. A. Velázquez y C. G. Camacho R. 2004. *Indicadores para la caracterización y el ordenamiento territorial*. Semarnat. México, D.F., México. 161 p.

- Palma-López, D. J., Vázquez, N. C. J., Mata, Z. E. E., López, C. A., Morales, G. M. A., Chable, P. R., Palma-Cancino, D. Y. 2011. Zonificación de ecosistemas y agroecosistemas susceptibles de recibir pagos por servicios ambientales en la Chontalpa, Tabasco. Colegio de Postgraduados. Villahermosa, Tabs., México. 161 p.
- Palomeque-de la Cruz, M. Á., A. Galindo A., E. Pérez S., A. J. Sánchez y M. J. Escalona M. 2017. Modelos geomáticos con base en transición para el análisis espacial en Villahermosa, Tabasco. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 8(2): 253-267.
- Periódico Oficial. (2016). Plan Municipal de Desarrollo 2016-2018. Gobierno del estado de Tabasco. Huimanguillo, Tabs., México. 56 Páginas.
- Pinkus-Rendón, M. J. y A. Contreras-Sánchez. 2012. Impacto socioambiental de la industria petrolera en Tabasco: el caso de la Chontalpa. *Limina R* 10(2):122-144. doi: <http://dx.doi.org/10.29043/liminar.v10i2.99>.
- Pontius, R. G. 2000. Quantification error versus location error in comparison of categorical maps. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 66(8):1011-1016.
- Ramos-Reyes, R., R. Sánchez-Hernández y L. M. Gama-Campillo. 2016. Análisis de cambios de uso del suelo en el municipio costero de Comalcalco, Tabasco, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 3(8): 151-160.
- Reynoso S., R., J. R. Valdez L., M. J. Escalona M., H. M. de los Santos P. y M. J. Pérez H. 2016. Cadenas de Markov y autómatas celulares para la modelación de cambio de uso de suelo. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental* 37(1): 72-81.
- Rosete-Vergés, F. A., J. L. Pérez-Damián, M. Villalobos-Delgado, E. N. Navarro-Salas, E. Salinas-Chávez y R. Remond-Noa. 2014. El avance de la deforestación en México 1976-2007. *Madera y Bosques* 20(1):21-35. <https://doi.org/10.21829/myb.2014.201173>.

Rudel, T. K., R. Defries, G. P. Asner and W. F. Laurance. 2009. Changing drivers of deforestation and new opportunities for conservation. *Conservation Biology* 23(6):1396-1405. doi:10.1111/j.1523-1739.2009.01332.x.

Schmitz, C., U. Kreidenweis, H. Lotze-Campen, A. Popp, M. Krause, J. P. Dietrich and C. Müller. 2015. Agricultural trade and tropical deforestation: interactions and related policy options. *Regional Environmental Change* 15(8):1757-1772. <https://doi.org/10.1007/s10113-014-0700-2>.

Tudela, F. 1992. La modernización forzada del trópico: El caso de Tabasco, proyecto integrado del Golfo. Colegio de México. Instituto Politécnico Nacional. México, D.F., México. 475 p.

Yáñez-Arancibia, A., J. W. Day, R. R. Twilley y R. H. Day. 2014. Manglares: ecosistema centinela frente al cambio climático, Golfo de México. *Madera y Bosques* 20: 39-75. <https://doi.org/10.21829/myb.2014.200147>.

Zheng, D., L. S. Heath, M. J. Ducey and B. Quayle. 2013. Assessing Double Counting of Carbon Emissions between Forest Land-Cover Change and Forest Wildfires: A Case Study in the United States, 1992–2006. *Ecosystems* 16(2): 310-322. <https://doi.org/10.1007/s10021-012-9616-1>.



Todos los textos publicados por la **Revista Mexicana de Ciencias Forestales** –sin excepción– se distribuyen amparados bajo la licencia *Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional)*, que permite a terceros utilizar lo publicado siempre que mencionen la autoría del trabajo y a la primera publicación en esta revista.