

Modeling of land use/cover changes: prospective scenarios in the Estado de Mexico. Case study – Amanalco de Becerra

Modelado de cambios de cobertura y uso del suelo: escenarios prospectivos en el Estado de México. Estudio de caso Amanalco de Becerra

José M. Camacho-Sanabria^{1*}; José I. Juan-Pérez²; Noel B. Pineda-Jaimes³

¹Ciencias Ambientales, Facultad de Química, Universidad Autónoma del Estado de México. Paseo Colón esquina Paseo Tollocan s/n. C. P. 50120. Toluca, Edo. de México, MÉXICO.

Correo-e: jmanuelcs@live.com.mx Tel.: (722) 1581 333 (*Autor para correspondencia).

²Instituto de Estudios sobre la Universidad, Universidad Autónoma del Estado de México. Paseo Tollocan 1402 pte., Ciudad Universitaria. C. P. 50110. Toluca, Edo. de México, MÉXICO.

³Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México. Cerro de Coatepec s/n, Ciudad Universitaria. C. P. 50110. Toluca, Edo. de México, MÉXICO.

Abstract

The aim of this study is to assess the dynamics and processes of change that have occurred in the municipality of Amanalco de Becerra, State of Mexico, through the construction of a spatially explanatory model of land use/cover changes (LUCC). The modeling process was carried out using DINAMICA EGO, a mapping tool. Land use/cover maps for the years 1989, 1997 and 2009, as well as various explanatory physical-geographical, environmental and land tenure proximity variables, were used as map inputs. The LUCC for 2020 were modelled under two scenarios: 1) the trend model, which assumes that the annual change rates for the period 1997-2009 remain unaltered, and 2) the agropastoral model, which assumes that annual deforestation rates increase because of the establishment and development of farming activities. The analysis of the absolute values of the forest category, for each year, shows a trend towards the loss of forest cover; by contrast, the annual rates of change in the forest category show a trend towards recovery-revegetation-reforestation processes, as a result of the implementation of government environmental programs.

Keywords: DINAMICA EGO, rates of change, spatial model.

Resumen

El presente estudio tiene como propósito evaluar la dinámica y los procesos de transformación ocurridos en el municipio de Amanalco de Becerra, Estado de México, mediante la construcción de un modelo espacialmente explicativo de cambios de cobertura y uso del suelo (CCUS). El proceso de modelado se realizó con la herramienta DINAMICA EGO, utilizando como insumos cartográficos los mapas de uso de suelo y vegetación de los años 1989, 1997 y 2009, y algunas variables explicativas de proximidad, físico-geográficas, ambientales y de explotación de la tierra. Los CCUS se modelaron para el año 2020 bajo dos escenarios: tendencial y agropastoril. El escenario tendencial supone que las tasas anuales de cambio del periodo 1997-2009 se mantienen, mientras que el agropastoril presume que las tasas anuales de deforestación aumentan a causa de la apertura, establecimiento y desarrollo de actividades agropecuarias. El análisis de los valores absolutos de la categoría bosque, para cada año, muestra tendencia hacia la pérdida de la cobertura forestal; por lo contrario, las tasas anuales de cambio de esta misma cobertura tienden hacia procesos relacionados con la recuperación-revegetación-reforestación, producto de la implementación de programas ambientales gubernamentales.

Palabras clave: DINÁMICA EGO, Tasas de cambio, modelo espacial.

Introduction

The Estado de Mexico is a territory in which there is wide geographical, ecological and environmental diversity, associated with different cultural patterns and spatially-organized processes that in interaction make up a complex dynamic system (Juan, 2013a). The territory is characterized by the presence of important forest resources consisting of coniferous forest, broadleaf forest, mixed forest and cloud forest (together forming the temperate forest ecosystem). The usefulness and importance of these resources lie not only in the production of raw materials and economic goods, but also in the essential role they play in the functioning of the natural system (Pineda, Bosque, Gómez, & Plata, 2009). In the temperate and semi-cold environments of the Estado de Mexico, there are pine (*Pinus* sp.), sacred fir (*Abies religiosa* [Kunth] Schltld. & Cham.), oak (*Quercus* sp.), pine-sacred fir and pine-oak forest ecosystems that characterize the municipality of Amanalco de Becerra. The inhabitants of this territory, particularly ejido members and communal land owners, try as much as possible to take care of, conserve and restore ecosystems.

In recent decades, due to the development of government environmental programs, not only are forest ecosystems conserved, but they are also used sustainably. The ejido members and communal land owners of Amanalco de Becerra have benefited from these programs, among which “Community Forest Management,” “Commercial Forest Plantations” and “Payment for Hydrological Environmental Services” stand out (Comisión Nacional Forestal [CONAFOR], 2008; Protectora de Bosques del Estado de México [PROBOSQUE], 2008a, 2008b, 2009, 2010). Despite the existence and implementation of these programs, there is still great concern over the need to address environmental issues such as illegal logging, wildfires, overgrazing and growth of the agricultural frontier into forest areas. These problems contribute and, in a way, cause changes in plant cover and land use. For this reason, it is of utmost importance that the authorities responsible for the care, conservation and management of forest resources, in collaboration with specialists in the area, strive to design strategies that contribute to the maintenance and restoration of forest ecosystems that characterize Amanalco de Becerra. It is therefore advisable to make a multi-temporal analysis of the land use/cover changes that have occurred in this municipality, and thus build prospective scenarios to simulate their behavior.

In recent decades, the methods and techniques related to remote sensing (Chuvienco, 2008; Lira, 2010) and geomatics (Álvarez, 2012), applied to the study, monitoring and evaluation of natural resources, have led to significant progress in public policy decision-making aimed at the conservation, management and

Introducción

El Estado de México es un territorio en el que coexiste una amplia diversidad geográfica, ecológica y ambiental, asociada con diversos patrones culturales y procesos de organización espacial que en interacción conforman un sistema dinámico complejo (Juan, 2013a). La entidad se caracteriza por la presencia de importantes recursos forestales constituidos por bosque de coníferas, bosque de latifoliadas, bosque mixto y bosque mesófilo de montaña (en conjunto forman el ecosistema de bosques templados). La utilidad e importancia de estos recursos no sólo radica en la producción de materias primas y bienes económicos, sino en el papel esencial que desempeñan para el funcionamiento del sistema natural (Pineda, Bosque, Gómez, & Plata, 2009). En los ambientes templados y semifríos del Estado de México se localizan los ecosistemas forestales de pino (*Pinus* sp.), oyamel (*Abies religiosa* [Kunth] Schltld. & Cham.), encino (*Quercus* sp.), pino-oyamel y pino-encino que caracterizan al municipio de Amanalco de Becerra. Los habitantes de este territorio, en particular los ejidatarios y comuneros, procuran en la medida de lo posible, el cuidado, conservación y restauración de los ecosistemas.

En las últimas décadas, debido al desarrollo de programas ambientales gubernamentales, los ecosistemas forestales no sólo se conservan, también se aprovechan de manera sustentable. Los ejidatarios y comuneros de Amanalco de Becerra se han beneficiado de dichos programas, entre los cuales destacan el “Manejo Forestal Comunitario”, “Plantaciones Forestales Comerciales” y el “Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos” (Comisión Nacional Forestal [CONAFOR], 2008; Protectora de Bosques del Estado de México [PROBOSQUE], 2008a, 2008b, 2009, 2010). Pese a la existencia e implementación de éstos, aún resalta la preocupación de problemáticas ambientales por atender como la tala clandestina, los incendios forestales, el sobrepastoreo y el crecimiento de la frontera agrícola en áreas con vocación forestal. Estas problemáticas contribuyen y, en cierta forma, ocasionan cambios en las coberturas vegetales y usos del suelo. Por lo anterior, es de suma importancia que las autoridades responsables del cuidado, conservación y manejo de los recursos forestales, en colaboración con los especialistas en el área, se esfuercen para diseñar estrategias que coadyuven al mantenimiento y restauración de los ecosistemas forestales que caracterizan a Amanalco de Becerra. Para ello, es recomendable hacer un análisis multitemporal de los procesos de cambio que experimentan las coberturas vegetales y usos del suelo de este municipio, y así construir escenarios prospectivos para simular el comportamiento de los mismos.

En las últimas décadas, los métodos y técnicas relacionadas con la teledetección (Chuvienco, 2008; Lira, 2010) y la geomática (Álvarez, 2012), aplicados al estudio, monitoreo y evaluación de los recursos

restoration of terrestrial, aquatic, marine and wetland ecosystems. Also, the use of geographic information systems (GIS) has contributed to the development of studies with the following objectives: a) describe and evaluate, from a quantitative point of view, the dynamics of land use/cover changes in a given territory and in a temporal dimension; b) identify and predict the areas most susceptible to change; c) understand the processes that lead to changes, in relation to use and application of explanatory spatial variables and d) model change processes for building prospective scenarios (Mas & Flamenco, 2011; Veldkamp & Lambin, 2001; Xiang & Clarke, 2003).

The aim of this study was to develop a spatial model of land use/cover changes in the municipality of Amanalco de Becerra, from land-use and vegetation maps for the years 1989, 1997 and 2009, in conjunction with explanatory cartographic variables, using the DINAMICA EGO tool. This was done in order to assess the dynamics of land use and transformation processes that have occurred in the plant cover and thus build prospective scenarios.

Materials and methods

Characterization of study area

The municipality of Amanalco de Becerra is located in the western portion of the State of Mexico; the geographical location corresponds to the extreme coordinates: 19° 10' 36" and 19° 19' 55" NL, and 99° 54' 09" and 100° 04' 20" WL. Amanalco de Becerra covers an area of 219.5 km², of which 123 km² correspond to forest land use (56 %), 81.5 km² to agricultural use (37.1 %), 13.5 km² to livestock use (6.2 %) and 1.5 km² to urban use (0.7 %) (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2002).

From a biogeographical perspective, the study area is located in the Mexican Transition Zone (MTZ), considered one of the major biomes of Mexico and the result of the overlapping of ecosystems that characterize the Nearctic and Neotropical floristic regions (Halffter, 2003). According to Juan (2013b), the area is an ecological transition or ecotone zone (Figure 1). The geographical and ecological conditions that describe the MTZ have made possible the origin, development and spatial distribution of various terrestrial ecosystems, especially those related to tropical and temperate environments (Halffter, 2003). In the latter, where the terrestrial ecosystems that characterize Amanalco de Becerra are located, namely: coniferous forest (sacred fir forest and pine forest), broadleaf forest (oak forest), coniferous-broadleaf forest (pine-oak forest) and pasture (PROBOSQUE, 2010).

naturales han propiciado avances importantes para la toma de decisiones de política pública orientadas a la conservación, manejo y restauración de los ecosistemas terrestres, acuáticos, marinos y de humedales. Asimismo, el uso de los sistemas de información geográfica (SIG) han contribuido al desarrollo de estudios que tienen como objetivos: a) describir y evaluar, desde el punto de vista cuantitativo, la dinámica de cambios de las coberturas vegetales y usos del suelo de un determinado territorio y en una dimensión temporal; b) identificar y predecir las áreas más susceptibles a cambiar; c) comprender los procesos que conllevan a los cambios, con relación al uso y la aplicación de variables espaciales explicativas y d) modelar los procesos de cambio para la construcción de escenarios prospectivos (Mas & Flamenco, 2011; Veldkamp & Lambin, 2001; Xiang & Clarke, 2003).

El objetivo de este estudio fue desarrollar un modelo espacial de cambios de cobertura y uso del suelo en el municipio de Amanalco de Becerra, a partir de mapas de uso de suelo y vegetación de los años 1989, 1997 y 2009, en complemento con variables cartográficas explicativas, mediante la herramienta DINAMICA EGO. Lo anterior con el fin de evaluar la dinámica de uso del suelo y los procesos de transformación ocurridos en la cubierta vegetal y así construir escenarios prospectivos.

Materiales y métodos

Caracterización del área de estudio

El municipio de Amanalco de Becerra se ubica en la porción oeste del Estado de México; la localización geográfica corresponde a las coordenadas extremas: 19° 10' 36" y 19° 19' 55" LN, y 99° 54' 09" y 100° 04' 20" LO. La extensión territorial de Amanalco de Becerra es de 219.5 km², de los cuales 123 km² corresponden al uso de suelo forestal (56 %), 81.5 km² al uso agrícola (37.1 %), 13.5 km² al uso pecuario (6.2 %) y 1.5 km² al uso urbano (0.7 %) (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2002).

Desde una perspectiva biogeográfica, el área de estudio se ubica en la zona de transición mexicana (ZTM), considerada uno de los principales biomas del territorio mexicano y resultado de la imbricación de los ecosistemas que caracterizan a las regiones florísticas Neártica y Neotropical (Halffter, 2003). De acuerdo con Juan (2013b), el área es una zona de transición ecológica o de ecotono (Figura 1). Las condiciones geográficas y ecológicas que describen la ZTM han posibilitado el origen, desarrollo y distribución espacial de diversos ecosistemas terrestres, sobre todo aquellos relacionados con ambientes tropicales y templados (Halffter, 2003). En estos últimos se ubican los ecosistemas terrestres que caracterizan al municipio de Amanalco de Becerra:

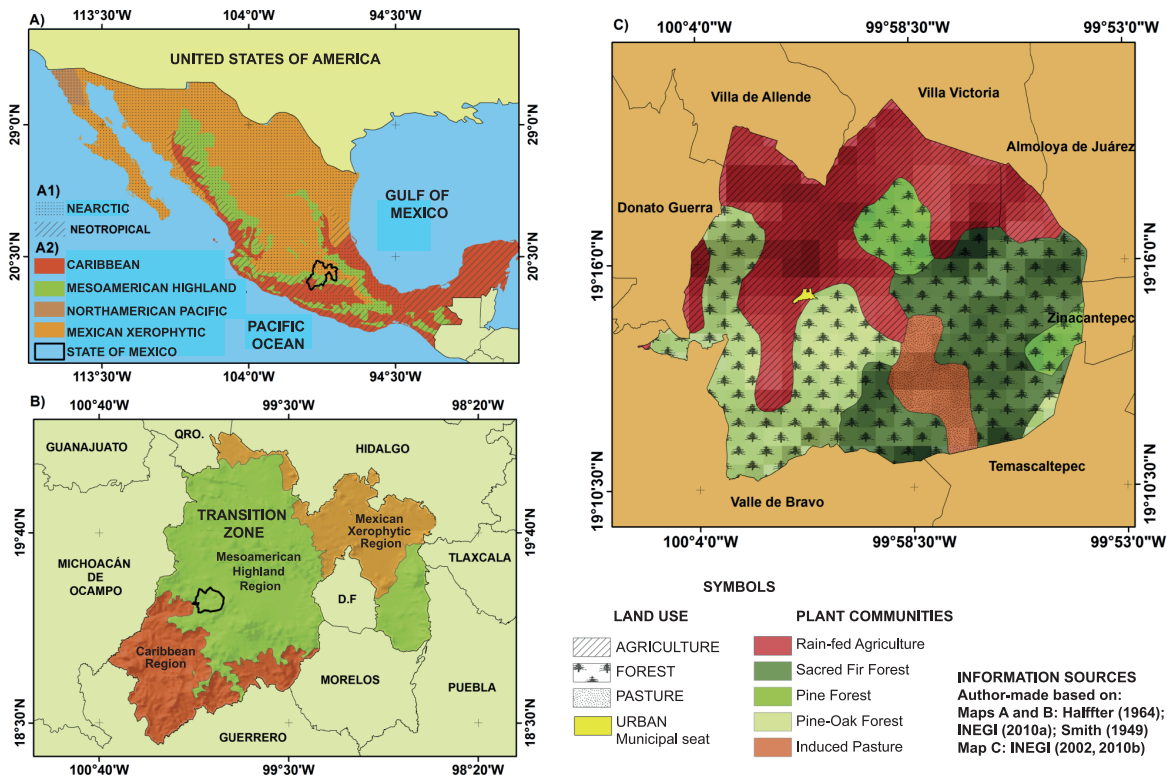


Figure 1. Geographical location of the municipality of Amanalco Becerra, Estado de México in a state and national context. A) Floristic kingdoms (A1) and regions of Mexico (A2), B) Transition zone of the State of Mexico and C) Plant communities and land use in the study area.

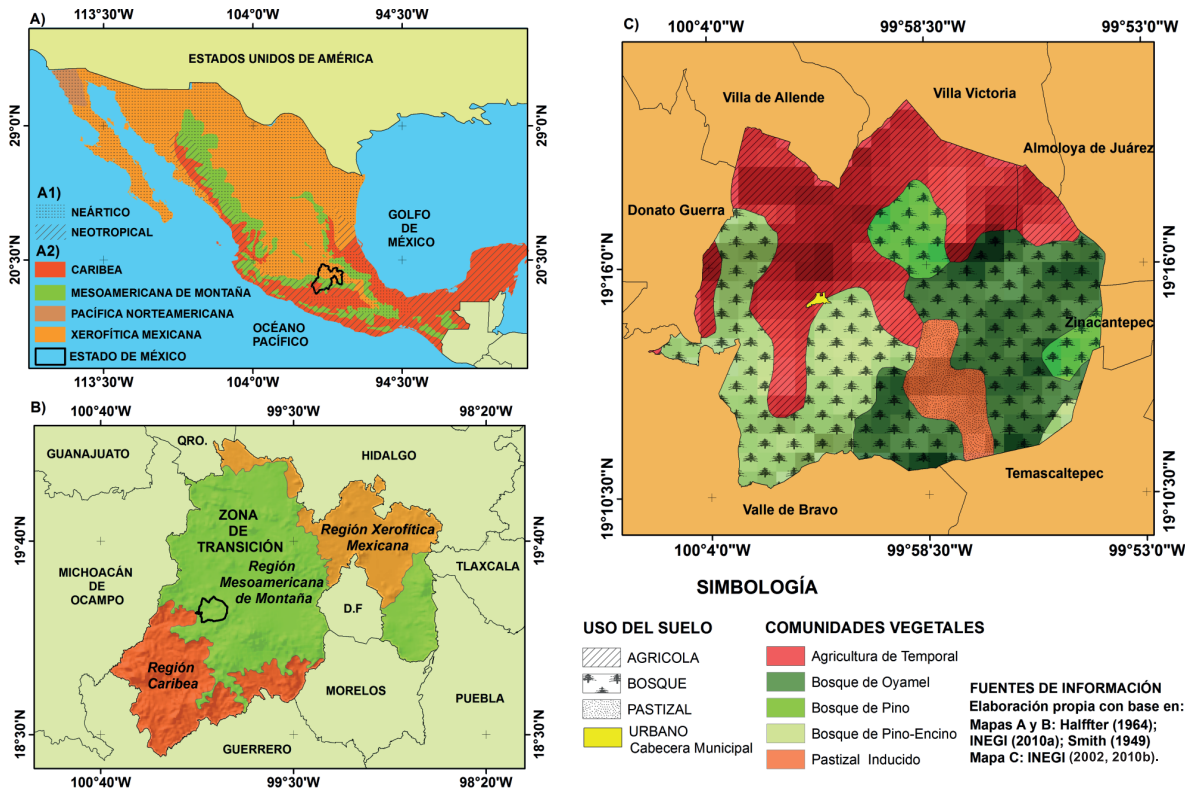


Figura 1. Localización geográfica del municipio de Amanalco de Becerra, Estado de México en el contexto estatal y nacional. A) Reinos (A1) y regiones florísticas de México (A2), B) Zona de transición del Estado de México y C) Comunidades vegetales y uso del suelo del área de estudio.

Modeling of land use/cover changes

The explanatory model of land use/cover changes (LUCC) was built using land-use and vegetation (LUV) maps derived from the visual interpretation (interdependent classification method: Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO, 1996]) of Landsat TM (Thematic Mapper) satellite images for the following dates: a) December 27, 1989, b) December 9, 1997 and c) November 24, 2009 (corresponding to path 27 and row 47). The LUV maps were subjected to the thematic reliability assessment process (Mas, Diaz, & Pérez, 2003) considering the following as reference data: 1) images of very high spatial resolution of dates close to those used in this study, such as Global Map images (0.4 m) available on the Google Earth web server (Champo, Valderrama, & España, 2012); and 2) control points collected during on-site field trips on October 27, 2012 and July 4, 2013. The model was also built using proximity (at pixel level) environmental, physical-geographic and land tenure cartographic variables. Table 1 shows the map inputs used to build the model. The use and application of these inputs helped to explain the changes that have occurred in plant cover and land use in Amanalco de Becerra, from a quantitative approach.

The modeling process was performed with the DINAMICA EGO geotechnological tool, an environmental modeling program (Soares-Filho, Rodrigues, & Costa, 2009) used by the scientific community in various studies associated with modelling processes related to deforestation in tropical environments (Maeda et al., 2011; Mas & Flamenco, 2011; Pérez, Mas, & Ligmann, 2012) and urban growth (Bahadur & Murayama, 2011; Godoy & Soares-Filho, 2008). According to Mas, Kolb, Paegelow, Camacho, and Houet (2014), the DINAMICA EGO tool, compared to other programs used for LUCC modeling, is much better due to its flexibility and its possibilities of interaction with other tools, as it has most of the GIS operators and enables the development of sophisticated models.

Land use/cover change rates

To assess the dynamics and processes of land use/cover changes that have occurred in Amanalco de Becerra, change rates in the periods 1989-1997 and 1997-2009 were determined from the areas obtained for each category and each date, and based on the FAO equation (1996):

$$r = 1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^{\frac{1}{t}}$$

where:

r = Rate of change

A₁ = Area covered by a given land use/cover at time 1

Bosque de coníferas (bosque de oyamel y bosque de pino), bosque de latifoliadas (bosque de encino), bosque de coníferas-latifoliadas (bosque de pino-encino) y pastizales (PROBOSQUE, 2010).

Modelado de cambios de cobertura y uso de suelo

El modelo explicativo de cambios de cobertura y uso de suelo (CCUS) se construyó utilizando mapas de uso de suelo y vegetación (USV) derivados de la interpretación visual (método de clasificación interdependiente: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO, 1996]) de imágenes de satélite Landsat TM (Thematic Mapper) correspondientes a las fechas: a) 27 de diciembre de 1989, b) 9 de diciembre de 1997 y c) 24 de noviembre de 2009 (corresponden al *path* 27 y *row* 47). Los mapas de USV se sometieron al proceso de evaluación de confiabilidad temática (Mas, Díaz, & Pérez, 2003) considerando como datos de referencia: 1) imágenes de muy alta resolución espacial de fechas próximas a las utilizadas en el presente estudio, como las imágenes del *Global Map* (de 0.4 m) disponibles en el servidor web *Google Earth* (Champo, Valderrama, & España, 2012); y 2) puntos de control recopilados a partir de los recorridos de campo *in situ*, durante las fechas 27 de octubre de 2012 y 4 de julio de 2013. El modelo también se construyó utilizando variables cartográficas de proximidad (a nivel píxel), ambientales, físico-geográficas y de explotación de la tierra. El Cuadro 1 presenta los insumos cartográficos utilizados para la construcción del modelo. El uso y aplicación de estos insumos coadyuvó a explicar los cambios ocurridos en las coberturas vegetales y usos del suelo en Amanalco de Becerra, desde un enfoque cuantitativo.

El proceso de modelado se realizó con la herramienta geotecnológica DINAMICA EGO, un programa de modelación medio-ambiental (Soares-Filho, Rodrigues, & Costa, 2009) utilizado por la comunidad científica en distintas investigaciones asociadas con la modelación de procesos de deforestación en ambientes tropicales (Maeda et al., 2011; Mas & Flamenco, 2011; Pérez, Mas, & Ligmann, 2012) y de crecimiento urbano (Bahadur & Murayama, 2011; Godoy & Soares-Filho, 2008). Según Mas, Kolb, Paegelow, Camacho, y Houet (2014), la herramienta DINAMICA EGO, en comparación con otros programas utilizados para la modelación de CCUS, es mucho mejor por su flexibilidad y sus posibilidades de interacción con otras herramientas, ya que presenta la mayoría de los operadores de un SIG y permite el desarrollo de modelos sofisticados.

Tasas de cambio de cobertura y uso del suelo

Para evaluar la dinámica y los procesos de cambio ocurridos en las coberturas y usos del suelo del

Table 1. Map inputs used in building an explanatory model of land use/cover changes in Amanalco de Becerra, Estado de Mexico.

Category	Map input	Scale or resolution	Description	Source	Type
Thematic	Land use/cover maps	1:50,000	Land use/cover maps for the years 1989, 1997 and 2009. Categories or classes of analysis: a) forest, b) agriculture, c) pasture, d) human settlements, e) waterbodies	Author-made (Products derived from visual interpretation of Landsat TM satellite images)	Categorical or discrete
Pixel-level proximity	Distance to urban areas	1:50,000	Euclidean distance to urban areas	Author-made based on municipal geostatistical framework (INEGI, 1995)	Continuous
	Distance to rural roads	1:50,000	Euclidean distance to rural roads	Author-made based on topographic maps (INEGI, 1996, 1998, 1999, 2000, 2009)	Continuous
	Distance to highways	1:50,000	Euclidean distance to highways	Author-made based on topographic maps (INEGI, 1996, 1998, 1999, 2000, 2009)	Continuous
	Distance to towns	1:50,000	Euclidean distance to towns	Author-made based on municipal geostatistical framework (INEGI, 1995)	Continuous
	Distance to certain changes and land use	1:50,000	Euclidean distance to agriculture and pasture	Author-made	Continuous
Form of land use	Land tenure	1:50,000	Categories of land ownership: colonial, federal, private and social	INEGI (2007)	Categorical or discrete
Environmental	Environmental fragility	1:250 000	Categories of a system's susceptibility or capacity to change: Minimum, medium, high and maximum	Gobierno del Estado de Mexico (2006)	Categorical or discrete
	Protected Natural Areas (PNA)	1:250,000	Polygons corresponding to PNA: Nevado de Toluca National Park, Los Reyes hill, Piedra Herrada hill and San Antonio-San Francisco hills	Gobierno del Estado de Mexico (2006)	Categorical or discrete (binary: within/outside of a protected area)
Physical-geographic	Digital Elevation Model (DEM)	15-m pixels resampled at 30 m	Relief of continuous Mexican elevation values	INEGI (2003)	Continuous
	Slopes	15-m pixels resampled at 30 m	Slopes obtained from DEM	Author-made based on INEGI (2003)	Continuous

Cuadro 1. Insumos cartográficos utilizados en la construcción del modelo explicativo de cambios de cobertura y uso de suelo de Amanalco de Becerra, Estado de México.

Categoría	Insumo cartográfico	Escala o resolución	Descripción	Fuente	Tipo
Temática	Mapas de uso de suelo y vegetación	1:50,000	Mapas de uso de suelo y vegetación de los años 1989, 1997 y 2009. Categorías o clases de análisis: a) bosque, b) agricultura, c) pastizal, d) asentamientos humanos, e) cuerpos de agua	Elaboración propia (Productos derivados de la interpretación visual de las imágenes de satélite Landsat TM)	Categoría o discreta
De proximidad a nivel pixel	Distancia a áreas urbanas	1:50,000	Distancia euclidiana a áreas urbanas	Elaboración propia con base en el marco geoestadístico municipal (INEGI, 1995)	Continua
	Distancia a caminos rurales	1:50,000	Distancia euclidiana a caminos rurales	Elaboración propia con base en mapas topográficos (INEGI, 1996, 1998, 1999, 2000, 2009)	Continua
	Distancia a carreteras	1:50,000	Distancia euclidiana a carreteras	Elaboración propia con base en mapas topográficos (INEGI, 1996, 1998, 1999, 2000, 2009)	Continua
	Distancia a localidades	1:50,000	Distancia euclidiana a localidades	Elaboración propia con base en el marco geoestadístico municipal (INEGI, 1995)	Continua
	Distancia a ciertos cambios y usos de suelo	1:50,000	Distancia euclidiana a agricultura y pastizal	Elaboración propia	Continua
Forma de explotación de la tierra	Tenencia de la tierra	1:50,000	Categorías de la propiedad de los terrenos: de colonia, federal, privada y social	INEGI (2007)	Categoría o discreta
Ambientales	Fragilidad ambiental	1:250 000	Categorías de la susceptibilidad o capacidad de cambio de un sistema: Mínima, media, alta y máxima	Gobierno del Estado de México (2006)	Categoría o discreta
	Áreas Naturales Protegidas (ANP)	1:250,000	Polígonos correspondientes a las ANP: Parque Nacional Nevado de Toluca, cerro los Reyes, cerro Piedra Herrada y cerros San Antonio-San Francisco	Gobierno del Estado de México (2006)	Categoría o discreta (binaria: dentro/fuera de un área protegida)
Físico - geográficos	Modelo Digital de Elevación (MDE)	Píxeles de 15 m remuestreados a 30 m	Recorte del continuo de elevaciones mexicano	INEGI (2003)	Continua
	Pendientes	Píxeles de 15 m remuestreados a 30 m	Pendientes obtenidas a partir del MDE	Elaboración propia con base en INEGI (2003)	Continua

A_2 = Area of the same land use/cover at time 2
 n = Number of years in the period evaluated

Construction of the dynamic model of change

Building the dynamic model of change required implementing the following stages (Mas & Flamenco, 2011):

Calibration. At this stage, the LUV maps for 1989 and 1997 were overlaid to generate the probability of change matrices for the analysis categories through the Markov chain method (Eastman, 2009; Paegelow & Camacho, 2008). These matrices correspond to the transition probability rates of the observation period (1989-1997 = 8 years) and annual transition probability rates (Soares-Filho, Pennachin, & Cerqueira, 2002). Based on the latter rates, projections related to LUCC were made.

The relationship between the explanatory cartographic variables and the probability of change was established with the weights of evidence method (Bonham-Carter, 1994), which is implicit in the DINAMICA EGO tool. Weights of evidence were calculated (Soares-Filho et al., 2010) for each transition based on the explanatory mapping variables. Because weights of evidence can only be calculated for the categorical variables, it was necessary to determine intervals to categorize the continuous variables, which are shown in Table 2.

The coefficients derived from the calculation of weights of evidence were modified for some explanatory variables, based on expert knowledge. The explanatory variables for each transition were selected by observing and analyzing the graphical behavior (trend based on differentiated values) expressed by the weights of evidence and the statistical significance of their value (Mas & Flamenco, 2011). The weights of evidence method assumes that maps used as inputs in building a model must be spatially independent (Bonham-Carter, 1994). The independence shown by the explanatory cartographic variables was verified with the Crammer index. The calculation of this indicator enabled differentiating those variables that registered a high spatial correlation (Crammer > 0.5).

Simulation. Based on the weights of evidence and the aforementioned map inputs, a probability map for each transition was developed. From these maps, in association with the annual transition matrix (calibrated for the period 1989-1997), prospective land-use and vegetation change maps for 2009 (simulated maps) were made.

The DINAMICA EGO tool uses two cellular automata so that the modeled changes have a realistic spatial configuration: a) EXPANDER, which simulates changes

municipio de Amanalco de Becerra, se determinaron las tasas de cambio en los periodos 1989-1997 y 1997-2009, a partir de las superficies obtenidas de cada categoría y cada fecha, con base en la ecuación de la FAO (1996):

$$t = 1 - \left(\frac{S_2}{S_1} \right)^{\frac{1}{n}}$$

donde:

t = Tasa de cambio

S_1 = Superficie de un tipo dado de cobertura/uso del suelo en el tiempo 1

S_2 = Superficie de la misma cobertura/uso en el tiempo 2

n = Número de años transcurridos en el periodo evaluado

Construcción del modelo dinámico de cambio

La construcción del modelo dinámico de cambio requirió de la implementación de las siguientes fases o etapas (Mas & Flamenco, 2011):

Calibración. En esta fase, los mapas de USV de los años 1989 y 1997 se superpusieron para obtener las matrices de probabilidad de cambio de las categorías de análisis, a través del método de cadenas de Markov (Eastman, 2009; Paegelow & Camacho, 2008). Estas matrices corresponden a las tasas de probabilidad de transición del periodo de observación (1989-1997 = 8 años) y a las tasas de probabilidad de transición anuales (Soares-Filho, Pennachin, & Cerqueira, 2002). Con base en estas últimas se realizaron proyecciones relacionadas con los CCUS.

La relación entre las variables cartográficas explicativas y la probabilidad de cambio se establecieron con el método de pesos de evidencia (Bonham-Carter, 1994) que se halla implícito en la herramienta DINAMICA EGO. Los pesos de evidencia se calcularon (Soares-Filho et al., 2010) para cada transición con base en las variables cartográficas explicativas. Debido a que los pesos de evidencia sólo se pueden calcular para las variables categóricas, fue necesario determinar intervalos para categorizar las variables continuas, las cuales se muestran en el Cuadro 2.

Los coeficientes derivados del cálculo de pesos de evidencia fueron modificados para ciertas variables explicativas, con base en el conocimiento de experto. Las variables explicativas para cada transición se seleccionaron a partir de la observación y análisis del comportamiento gráfico (tendencia sustentada en valores diferenciados) que expresan los pesos de evidencia y la significancia estadística de su valor (Mas & Flamenco, 2011). El método de pesos de evidencia supone que los mapas utilizados como insumos cartográficos en la construcción del modelo deben ser espacialmente independientes (Bonham-Carter,

Table 2. Intervals used in categorizing the continuous variables of each transition, for building a dynamic model of land use/cover changes in Amanalco de Becerra, State of Mexico.**Cuadro 2. Intervalos utilizados en la categorización de las variables continuas de cada transición, para la construcción del modelo dinámico de cambios de cobertura y uso de suelo de Amanalco de Becerra, Estado de México.**

Continuous variable/Variable continua	Interval/Intervalo	Description of the transition/Descripción de la transición	Type of transition or process/Tipo de transición o proceso
Distance to urban areas (m)/Distancia hacia áreas urbanas (m)	0 - 12,200		
Distance to rural roads (m)/Distancia a caminos rurales (m)	0 - 3,000		
Distance to highways (m)/Distancia a carreteras (m)	0 - 4,800		
Distance to towns (m)/Distancia a localidades (m)	0 - 5,400	From forest to agriculture and from forest to pasture/De bosque a agricultura y de bosque a pastizal	Deforestation/Deforestación
Distance to agricultural areas (m)/Distancia a zonas agrícolas (m)	0 - 3,800		
Distance to pasture areas (m)/Distancia a zonas de pastizal (m)	0 - 4,200		
Digital elevation model (m of elevation)/Modelo digital de elevación (m de altitud)	0 - 3,600		
Slopes (°)/Pendientes (°)	0 - 81		
Distance to urban areas (m)/Distancia hacia áreas urbanas (m)	0 - 12,000		
Distance to rural roads (m)/Distancia a caminos rurales (m)	0 - 1,400		
Distance to highways (m)/Distancia a carreteras (m)	0 - 4,000		
Distance to towns (m)/Distancia a localidades (m)	0 - 4,800	From agriculture to forest/De agricultura a bosque	Recovery-Revegetation-Reforestation/Recuperación-Revegetación-Reforestación
Distance to agricultural areas (m)/Distancia a zonas agrícolas (m)	0 - 200		
Distance to pasture areas (m)/Distancia a zonas de pastizal (m)	0 - 5,200		
Digital elevation model (m of elevation)/Modelo digital de elevación (m de altitud)	0 - 3,400		
Slopes (°)/Pendientes (°)	0 - 70		
Distance to urban areas (m)/Distancia hacia áreas urbanas (m)	0 - 12,000		
Distance to rural roads (m)/Distancia a caminos rurales (m)	0 - 2,700		
Distance to highways (m)/Distancia a carreteras (m)	0 - 4,800		
Distance to towns (m)/Distancia a localidades (m)	0 - 4,800	From pasture to agriculture/De pastizal a agricultura	Loss-Agricultural expansion/Pérdida-expansión agrícola
Distance to agricultural areas (m)/Distancia a zonas agrícolas (m)	0 - 3,600		
Distance to pasture areas (m)/Distancia a zonas de pastizal (m)	0 - 200		
Digital elevation model (m of elevation)/Modelo digital de elevación (m de altitud)	0 - 3,400		
Slopes (°)/Pendientes (°)	0 - 64		

by expansion and b) PARCHER, which generates new patches of change (Soares-Filho et al, 2002). The calculation of the parameters required by this tool for the expansion and creation of new patches (average size, variance and isometrics) was performed in ArcMap 10.1 software (Environmental Systems Research Institute [ESRI], 2012).

Evaluation. The performance of the prospective model of LUCC was assessed using a comparative analysis of the simulated 2009 map and the LUV map of the same year; the latter was a product of the visual interpretation of the 2009 Landsat TM satellite image. The comparison was based on the fuzzy similarity method that allows handling different tolerance levels (window sizes) in order to identify cases in which there is not a perfect match between the location of the simulated and observed change areas (Hagen, 2003).

Scenario building. Two scenarios for the year 2020 were projected: 1) the “trend” scenario, which assumes that the annual rates (Markov matrix) and the distribution of changes remain constant between the calibration period (1989-1997) and the simulated period (1997-2009); and 2) the “agropastoral” scenario, which assumes an increase in deforestation rates, resulting from the opening up of new spaces for the establishment and practice of farming activities. The construction of the latter scenario was based on the analysis and comparison of geospatial data associated with the LUV of the study area, which were obtained from the maps published by the INEGI (1997) and the Valle de Bravo-Amanalco de Becerra Watershed Commission (Comisión de la Cuenca de Valle de Bravo-Amanalco de Becerra, 2011).

Results and discussion

Figure 2 shows the three land-use and vegetation maps of Amanalco de Becerra, for the years 1989, 1997 and 2009. The overall reliability or accuracy of these map inputs was above 95 %. This coefficient exceeds the minimum percentage of cartographic validation, which is 80 % (Mas & Couturier, 2011).

Rates of change

In Amanalco de Becerra, the most important change processes relate to deforestation, agricultural and livestock expansion and urban growth. Table 3 reports the annual rates of change by category and period. The deforestation rate recorded for the period 1989-1997 was -0.56 %. This coefficient is considered high compared to the overall annual deforestation rate of Nevado de Toluca National Park (located in the Estado de Mexico), which was -0.48 % over a 28-year period (1972-2000) (Franco, Regil, & Ordóñez, 2006). However, this comparison requires considering the number of

1994). La independencia que guardan las variables cartográficas explicativas se verificó con el índice de Crammer. El cálculo de este indicador permitió discriminar aquellas variables que registraron una alta correlación espacial (Crammer > 0.5).

Simulación. Con base en los pesos de evidencia y los insumos cartográficos referidos se elaboró un mapa de probabilidad para cada transición. A partir de estos mapas, en asociación con la matriz de transición anual (calibrada para el periodo 1989-1997), se construyeron mapas prospectivos de cambio de uso de suelo y vegetación para el año 2009 (mapas simulados).

La herramienta DINAMICA EGO utiliza dos autómatas celulares para que los cambios modelados tengan una configuración espacial realista: a) EXPANDER, que simula cambios por expansión y b) PARCHER, que genera nuevos parches de cambio (Soares-Filho et al., 2002). El cálculo de los parámetros que requiere esta herramienta para la expansión y creación de nuevos parches (tamaño promedio, varianza e isometría) se realizó en el software ArcMap 10.1. (Environmental Systems Research Institute [ESRI], 2012).

Evaluación. El desempeño del modelo prospectivo de CCUS se evaluó mediante un análisis comparativo entre el mapa simulado del año 2009 y el mapa de USV del mismo año; este último fue producto de la interpretación visual de la imagen de satélite Landsat TM del año 2009. La comparación se sustentó en el método de similitud difusa que permite manejar niveles distintos de tolerancia (tamaños de ventana), para identificar los casos en los cuales no existe una coincidencia perfecta entre la ubicación de las áreas de cambio simuladas y las observadas (Hagen, 2003).

Construcción de escenarios. Se proyectaron dos escenarios para el año 2020: 1) “tendencial”, que asume que las tasas anuales (matriz de Markov) y la distribución de los cambios se mantienen constantes entre el periodo de calibración (1989-1997) y el periodo simulado (1997-2009); y 2) “agropastoral”, que supone un aumento en las tasas de deforestación, producto de la apertura de nuevos espacios para el establecimiento y práctica de actividades agropecuarias. La construcción de este último escenario se sustentó en el análisis y comparación de datos geoespaciales asociados con el USV del área de estudio, los cuales se obtuvieron a partir de los mapas editados por el INEGI (1997) y la Comisión de la Cuenca de Valle de Bravo-Amanalco de Becerra (2011).

Resultados y discusión

La Figura 2 presenta los tres mapas de uso de suelo y vegetación del municipio de Amanalco de Becerra, correspondientes a los años 1989, 1997 y 2009. La

years of each period to compare, to avoid errors of interpretation and analysis. On the other hand, the annual deforestation rate for the 1997-2009 period decreased to -0.15 %. This behavior is similar to that recorded by the urban growth process, with 5.95 % for the first period and 1.60 % for the second. The annual rate of change for the agricultural expansion process was 0.28 % in both periods. Regarding the livestock expansion process, in the period 1989-1997 a rate of 1.96 % was recorded, whereas for the period 1997-2009 the rate decreased to -0.44 %.

Based on the data derived from the LUV maps obtained from the INEGI (1997) and the Valle de Bravo-Amanalco de Becerra Watershed Commission (2011), annual change rates recorded in the study area were 0.28 % for the forest category, -0.20 % for agriculture and -2.37 % for pasture in an 18-year period (1993-2011). Analysis of these data indicates that Amanalco de Becerra is experiencing a recovery-revegetation-reforestation process (Rosete et al., 2014), resulting from activities related to reforestation and the establishment of commercial forest plantations. By comparing the above data with the results obtained in the present study, it can be seen that, indeed, annual deforestation

confiabilidad global o exactitud general de estos insumos cartográficos fue mayor de 95 %. Este coeficiente excede el porcentaje mínimo de validación cartográfica que es de 80 % (Mas & Couturier, 2011).

Tasas de cambio

En el municipio de Amanalco de Becerra, los procesos de cambio más importantes hacen referencia a la deforestación, expansión agrícola y pecuaria y al crecimiento urbano. El Cuadro 3 reporta las tasas anuales de cambio por categoría y periodo. La tasa de deforestación registrada para el periodo 1989-1997 fue -0.56%. Este coeficiente se considera alto en comparación con la tasa general de deforestación anual del Parque Nacional Nevado de Toluca (ubicado en el Estado de México), que corresponde a -0.48 %, en un periodo de 28 años (1972-2000) (Franco, Regil, & Ordóñez, 2006). Sin embargo, esta comparación requiere considerar el número de años de cada periodo a comparar, para evitar errores de interpretación y análisis. Por otra parte, la tasa de deforestación anual para el periodo 1997-2009 decreció a -0.15 %. Este comportamiento es similar al registrado por el proceso de crecimiento urbano, con 5.95 % para el primer periodo y 1.60 % para

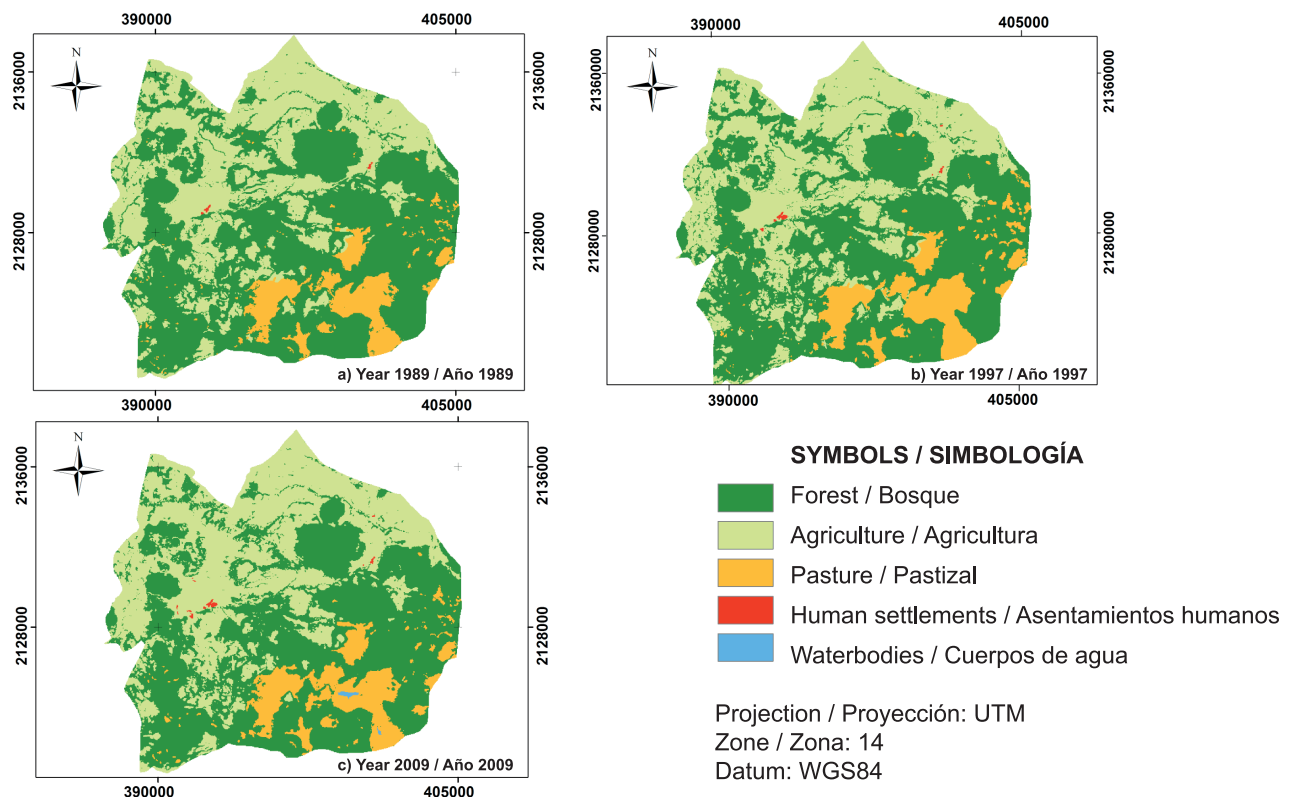


Figure 2. Land use/cover maps of the municipality of Amanalco de Becerra, Estado de México.

Figura 2. Mapas de uso de suelo y vegetación del municipio de Amanalco de Becerra, Estado de México.

Table 3. Area and annual rates of change by category and period in Amanalco de Becerra, State of Mexico.
Cuadro 3. Superficie y tasas anuales de cambio por categoría y periodo en Amanalco de Becerra, Estado de México.

Land use/cover categories/ Categorías de uso y cobertura del suelo	Annual area (ha)/ Superficie anual (ha)				Annual rate (%)/Tasa anual (%)		
	1989	1997	2009	1989-1997	Process/Proceso	1997-2009	Process/Proceso
Forest/Bosque	12,080	11,561	11,351	-0.56	Deforestation/ Deforestación	-0.15	Deforestation/ Deforestación
Agriculture/ Agricultura	7,925	8,109	8,396	0.28	Agricultural expansion/ Expansión agrícola	0.28	Agricultural expansion/ Expansión agrícola
Pasture/Pastizal	1,746	2,071	1,967	1.96	Livestock expansion/ Expansión pecuaria	-0.44	Loss/Pérdida
Human settlements/ Asentamientos humanos	11	21	26	5.95	Urban growth/ Crecimiento urbano	1.60	Urban growth/ Crecimiento urbano
Waterbodies/ Cuerpos de agua	*	*	22				

*The presence of waterbodies was not identified.

*No se identificó la presencia de cuerpos de agua.

rates between the periods 1989-1997 and 1997-2009 decreased considerably; therefore, the forest cover of Amanalco de Becerra shows a trend towards recovery-revegetation-reforestation.

Modelling process

During the calibration period (1989-1997), four major transitions in the territory comprising the municipality of Amanalco de Becerra were identified: two are processes related to deforestation, one to recovery-revegetation-reforestation and the other to loss-agricultural expansion. Figure 3 shows a diagram with these transitions.

The results of the analysis and observation of the graphic behavior of the weights of evidence of each explanatory cartographic variable show that in the case of the forest-agriculture transition (deforestation), the variable distance to urban areas was excluded. This is because the weights of evidence values of this variable showed a pattern of heterogeneous behavior and complexity for modeling. Under this criterion, the explanatory variables digital elevation model (DEM), distance to urban areas, distance to roads and slopes were discarded from the forest-pasture transition (deforestation). Also, the variables distance to urban areas and distance to agriculture were not considered for the agriculture-forest transition (recovery-revegetation-reforestation). In the case of the transition from pasture to agriculture (loss-agricultural expansion), the variables slope and

el segundo. La tasa anual de cambio correspondiente al proceso de expansión agrícola fue de 0.28 % en ambos periodos. Respecto al proceso de expansión pecuaria, en el periodo 1989-1997 se registró una tasa de 1.96 % y para el periodo 1997-2009, la tasa decreció a -0.44 %.

Con base en los datos derivados de los mapas de USV del INEGI (1997) y la Comisión de la Cuenca de Valle de Bravo-Amanalco de Becerra (2011), en el área de estudio se registraron tasas anuales de cambio de 0.28 % para la categoría bosque, -0.20 % para agricultura y -2.37 % para pastizal en un periodo de 18 años (1993-2011). El análisis de estos datos indica que el territorio de Amanalco de Becerra está experimentando un proceso de recuperación-revegetación-reforestación (Rosete et al., 2014), producto de la práctica de actividades relacionadas con la reforestación y el establecimiento de plantaciones forestales comerciales. Al comparar los datos anteriores con los resultados obtenidos en el presente estudio, se observa que, efectivamente, las tasas anuales de deforestación entre los periodos 1989-1997 y 1997-2009 disminuyeron considerablemente; por tanto, la cobertura de bosque de Amanalco de Becerra manifiesta una tendencia hacia la recuperación-revegetación-reforestación.

Proceso de modelación

Durante el periodo de calibración (1989-1997) se identificaron cuatro principales transiciones en el territorio que comprende el municipio de Amanalco de Becerra: dos corresponden a procesos relacionados

distance to urban areas, rural roads, highways, towns and pasture were discarded.

Based on the correlation analysis of the explanatory variables, it can be seen that due to the high values recorded, the variable protected natural areas (PNA) was excluded from the forest-agriculture, agriculture-forest and pasture-agriculture transitions. In the case of the forest-pasture transition, the PNA variable was not excluded from the simulation and scenario building phases, despite having registered values 0.5 above the Crammer index. The inclusion of PNA is attributed to the fact it constitutes an important explanatory factor in the study area for predicting deforestation-related processes. On the other hand, the explanatory variables federal property, maximum and minimum environmental fragility, and areas close to towns, pasture, highways and rural roads recorded the highest probabilities in the transitions involving deforestation. By contrast, the probabilities of this change process are lower at higher elevations (> 3,200 m).

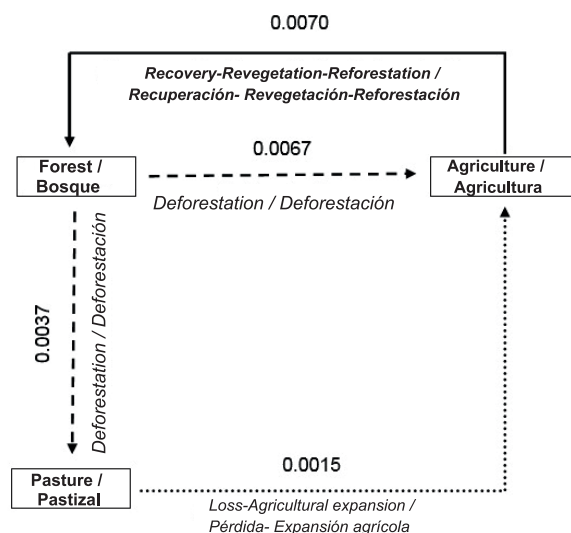


Figure 3. Major transitions identified during the period 1989-1997 in the municipality of Amanalco de Becerra, Estado de Mexico.

Figura 3. Principales transiciones identificadas durante el periodo 1989-1997 en el municipio de Amanalco de Becerra, Estado de México.

The results obtained in this study are consistent with the data reported by Pineda et al. (2009), who argue that proximity to roads remains a determining factor in deforestation processes in the Estado de Mexico. Thus, the two studies agree that proximity to highways and rural roads is one of the main causes that influences and determines the loss of forest cover. These same authors state that the loss of forest tracts increases in ecologically fragile areas; that is, that the most fragile areas that characterize ecosystems in the Estado de

con la deforestación, una al de recuperación-revegetación-reforestación y otra al proceso de pérdida-expansión agrícola. La Figura 3 muestra un esquema con dichas transiciones.

Los resultados del análisis y observación del comportamiento gráfico de los pesos de evidencia de cada variable cartográfica explicativa, muestran que en el caso de la transición de bosque a agricultura (deforestación), la variable distancia hacia áreas urbanas fue excluida. Lo anterior debido a que los valores correspondientes a los pesos de evidencia de esta variable manifestó un patrón de comportamiento heterogéneo y complejo de modelar. Bajo dicho criterio, las variables explicativas: modelo digital de elevación (MDE), distancia hacia áreas urbanas, distancia a carreteras y pendientes se descartaron de la transición de bosque a pastizal (deforestación). También las variables de distancia hacia áreas urbanas y distancia hacia agricultura no se consideraron para la transición de agricultura a bosque (recuperación-revegetación-reforestación). En el caso de la transición de pastizal a la agricultura (pérdida-expansión agrícola), las variables de pendiente, distancia hacia áreas urbanas, a caminos rurales, carreteras, localidades y pastizales se eliminaron.

Con base en el análisis correlacional de las variables explicativas se observa que, debido a los altos valores registrados, la variable áreas naturales protegidas (ANP) fue excluida de las transiciones de bosque hacia la agricultura, de agricultura a bosque y de pastizal a la agricultura. En el caso de la transición de bosque a pastizal, la variable ANP no fue excluida de las fases de simulación y construcción de escenarios, a pesar de haber registrado valores mayores de 0.5 con respecto al índice de Crammer. La inclusión de ANP se atribuye a que constituye un factor explicativo importante en el área de estudio para predecir procesos relacionados con la deforestación. Por otra parte, las variables explicativas propiedad federal, fragilidad ambiental máxima y mínima, y los espacios próximos a localidades, pastizales, carreteras y caminos rurales registraron las probabilidades más altas en las transiciones que implican deforestación. En contraste, las probabilidades de este proceso de cambio se reducen a altitudes mayores (> 3,200 m).

Los resultados obtenidos en este trabajo coinciden con los datos reportados por Pineda et al. (2009), quienes afirman que la cercanía a las vías de comunicación sigue siendo un factor determinante en los procesos de deforestación en el territorio del Estado de México. De este modo, se coincide en que la proximidad a las carreteras y caminos rurales son algunas de las principales causas que influyen y determinan la pérdida de la cobertura forestal. También estos mismos

Mexico have processes related to forest degradation, which is ecologically unsustainable. Indeed, the highest probabilities of deforestation in the study area were recorded in environments with maximum and minimum environmental fragility. By contrast, the DEM was one of the main explanatory variables that influenced the decrease in the probability associated with deforestation processes in the physical analysis space, especially at elevations above 3,200 m. On the other hand, it was noted that the variables slope (over 48°), distance to rural roads (1,000 to 1,400 m) and land tenure (land granted during colonial times) favor the probability of processes related to recovery-revegetation-reforestation.

In the case of the transition showing a loss-agricultural expansion process, the explanatory variables DEM, especially in the elevation range from 0 to 2,500 m, and mean environmental fragility act as the main factors benefitting the process.

In the simulation stage, transitions involving deforestation processes, particularly from forest to agriculture and forest to pasture, were observed; 92 % of the change resulted from the expansion of areas that were previously deforested, or that experienced some form of degradation. The same pattern was recorded in the transition expressing a recovery-revegetation-reforestation process, with 87 % of the change due to expansion. On the other hand, the loss-agricultural expansion process was the only transition that exhibited a higher percentage of changes due to patches (65 %).

As a result of the validation it was observed that, by using a 1 x 1 pixel window, the matching between simulated and observed changes is low: 7 % for the agropastoral scenario and 17 % for the trend scenario. However, it can be said that in the case of the trend scenario, the simulation reaches a similarity fit value of over 50 % at a tolerance distance of 135 m; for the agropastoral scenario, this percentage is noticeable at a distance of 285 m. Figure 4 represents the fuzzy similarity index in relation to window size.

Figure 5 shows an approximation of the spatial representation of the LUCC in the municipality of Amanalco de Becerra; that is, the observed changes in the 2009 map (Figure 5a) and the simulated changes for that same year and for each of the constructed scenarios (Figures 5b, 5c). Maps for the prospective scenarios (Figures 5d, 5e) are also included.

The results derived from the construction of the prospective scenarios predict two major change processes: a) an increase in annual deforestation rates (-0.51 % for the trend scenario and -1.58 % for the agropastoral scenario) and b) an increase in the annual

autores establecen que la pérdida de la masa forestal aumenta en zonas con fragilidad ecológica; es decir, que las zonas más frágiles que caracterizan a los ecosistemas del Estado de México presentan procesos relacionados con la degradación forestal, algo que resulta ecológicamente insostenible. En efecto, las probabilidades más altas de deforestación en el área de estudio se registraron en ambientes con fragilidad ambiental máxima y mínima. En contraste, el MDE fue una de las principales variables explicativas que influyó en la disminución de la probabilidad asociada a procesos de deforestación en el espacio físico de análisis, sobre todo, en altitudes superiores a 3,200 m. Por otra parte, se observó que las variables pendiente (mayor de 48°), distancia a caminos rurales (1,000 a 1,400 m) y tenencia de la tierra (propiedad de colonia) favorecen la probabilidad de procesos relacionados con la recuperación-revegetación-reforestación.

En el caso de la transición que manifiesta un proceso de pérdida-expansión agrícola, las variables explicativas MDE, sobre todo en el intervalo altitudinal de 0 a 2,500 m, y la fragilidad ambiental media actúan como principales factores que benefician a dicho proceso.

En la etapa de simulación se observó que en las transiciones que implican procesos de deforestación, en particular de bosque a agricultura y de bosque a pastizal, 92 % de los cambios es resultado de la expansión de áreas que fueron deforestadas previamente, o bien, que sufrieron algún tipo de degradación. Este mismo patrón se registró en la transición que expresa un proceso de recuperación-revegetación-reforestación, con 87 % de cambios por expansión. Por su parte, el proceso de pérdida-expansión agrícola fue la única transición que exhibió mayor porcentaje de cambios por parches (65 %).

Como resultado de la validación se observó que, al utilizar una ventana de 1 x 1 píxel, la coincidencia entre los cambios simulados y los observados es baja: 7 % corresponde al escenario agropastoril y 17 % al escenario tendencial. No obstante, se puede afirmar que para el caso del escenario tendencial, la simulación alcanza un valor de ajuste de similitud de más de 50 % a una distancia de tolerancia de 135 m; para el escenario agropastoril, este porcentaje es notorio a una distancia de 285 m. La Figura 4 representa el índice de similitud difusa en relación con el tamaño de la ventana.

La Figura 5 muestra una aproximación de la representación espacial de los CCUS en el municipio de Amanalco de Becerra; es decir, las transformaciones observadas en el mapa 2009 (Figura 5a), así como los cambios simulados para este mismo año y para cada uno de los escenarios construidos (Figuras 5b, 5c). También se incluyen los mapas correspondientes a los escenarios prospectivos (Figuras 5d, 5e).

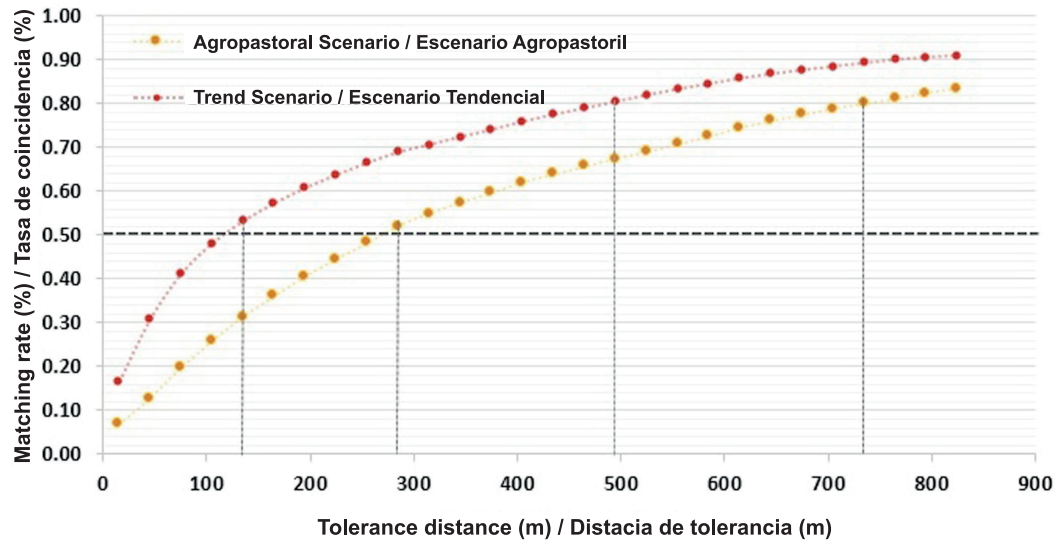


Figure 4. Fuzzy similarity index in relation to window size or spatial resolution (tolerance distance). Scenario building.

Figura 4. Índice de similitud difusa en relación con el tamaño de la ventana o resolución espacial (distancia de tolerancia). Construcción de escenarios.

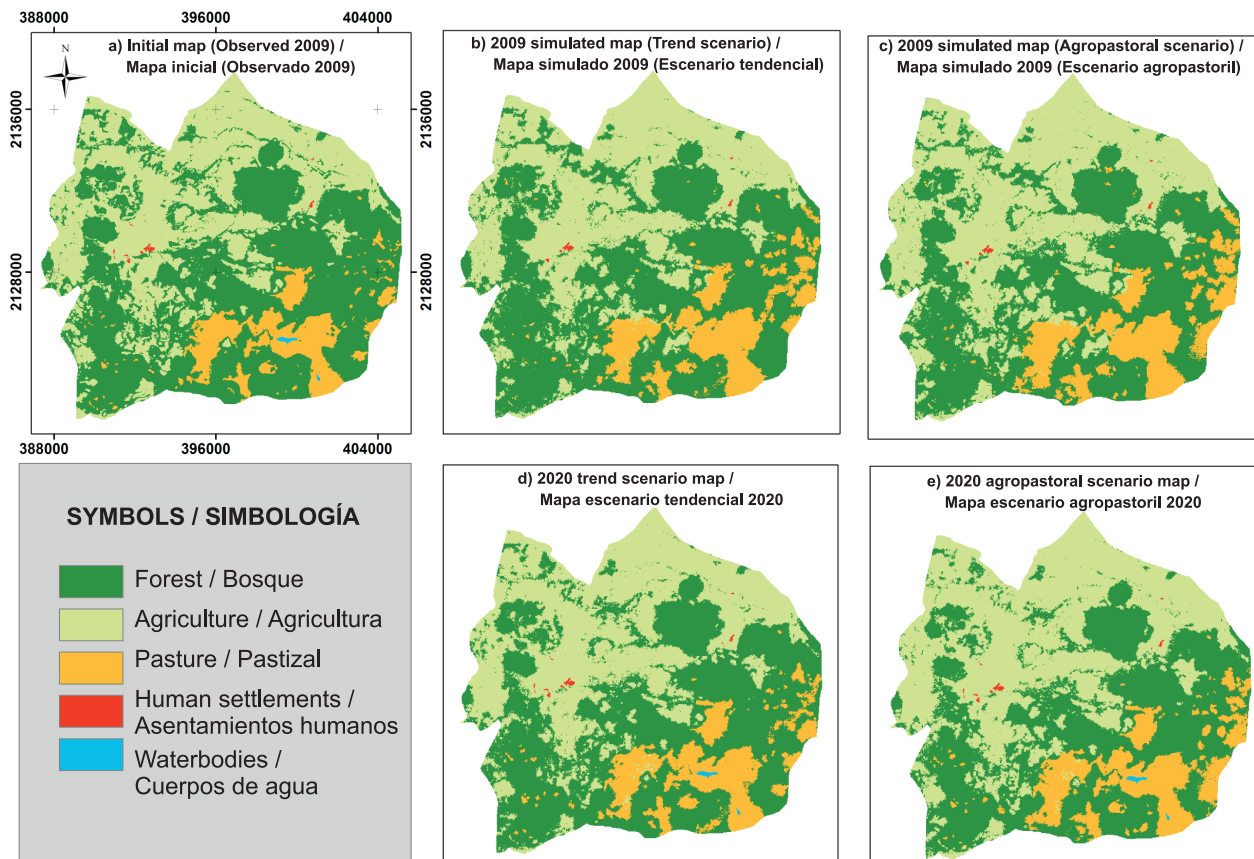


Figure 5. Maps of land use/cover changes in Amanalco de Becerra, Estado de México: Observed, simulated and prospective.

Figura 5. Mapas de cambio de uso del suelo y vegetación en Amanalco de Becerra, Estado de México: Observado, simulados y prospectivos.

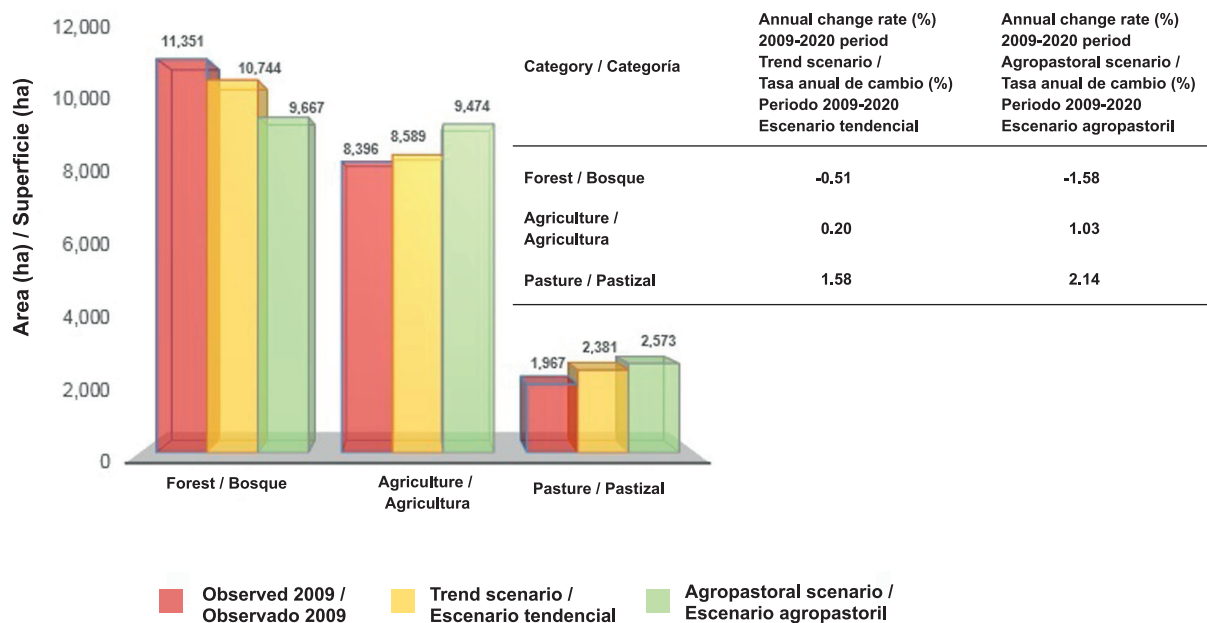


Figure 6. Area of each land use/cover category observed in 2009 and estimated for the trend and agropastoral scenarios for 2020. Case Study: Amanalco de Becerra, Estado de Mexico.

Figura 6. Superficie de cada categoría de cobertura y uso del suelo observada en 2009 y estimada para el escenario tendencial y agropastoril para el año 2020. Estudio de caso Amanalco de Becerra, Estado de México.

rates associated with agricultural frontier growth processes (0.20 % for the first scenario and 1.03 % for the second) and expansion of areas for the establishment and development of livestock activities (1.58 and 2.14 %, respectively) (Figure 6).

Conclusions

Amanalco de Becerra underwent significant land use/cover changes. The annual rates of change of the forest category between 1989-1997 and 1997-2009 indicate that forest ecosystems show a trend towards recovery-revegetation-reforestation, a situation attributed to the implementation of government environmental programs. However, the multi-temporal analysis of the forest category areas (absolute values) shows a trend towards deforestation-related processes. On the other hand, the annual change rates for the trend and agropastoral scenarios expressed a pattern of behavior that involves a decrease in forest areas and an increase in areas devoted to establishing, developing and carrying out farming activities. This would lead to the loss of diversity of biological species, deterioration and degradation of soils, changes in the microclimate and modification of the functioning of the Amanalco river and Molino-Los Hoyos river hydrographic sub-basins, and the Valle de Bravo-Amanalco watershed (included in the Cutzamala system that provides drinking water to Mexico City and the Estado de Mexico). The constructed model is a useful tool to predict land use/cover changes in Amanalco de Becerra, as well as the

Los resultados derivados de la construcción de los escenarios prospectivos predicen dos procesos de cambio importantes: a) incremento en las tasas anuales de deforestación (-0.51 % para el escenario tendencial y -1.58 % para el escenario agropastoril) y b) aumento en las tasas anuales asociadas con los procesos de crecimiento de la frontera agrícola (0.20 % para el primer escenario y 1.03 % para el segundo) y expansión de áreas destinadas al establecimiento y desarrollo de actividades pecuarias (1.58 y 2.14 %, respectivamente) (Figura 6).

Conclusiones

Amanalco de Becerra experimentó cambios significativos en las coberturas y usos del suelo. Las tasas anuales de cambio de la categoría bosque entre 1989-1997 y 1997-2009 indican que los ecosistemas forestales tienden a la recuperación-revegetación-reforestación, situación atribuida a la implementación de programas ambientales gubernamentales. Sin embargo, el análisis multitemporal de las superficies de la categoría bosque (valores absolutos) tiende a procesos relacionados con la deforestación. Por otra parte, las tasas anuales de cambio de los escenarios tendencial y agropecuario expresaron un patrón de comportamiento que supone el decremento de las zonas de bosque y aumento de las áreas orientadas al establecimiento, desarrollo y práctica de actividades agropecuarias. Esto conduciría a la pérdida de diversidad de especies biológicas, deterioro y degradación de suelos, cambios en el microclima y modificación del funcionamiento de las

potential impacts under the assumption referred to above. However, the model results are not exact and should be interpreted based on the limitations of the approach (quantitative), methods and materials used in this study.

End of English version

References / Referencias

- Álvarez, P. (2012). Aplicaciones de geomática para la toma de decisiones. *Revista Internacional de Estadística y Geografía*, 3(1), 90–99. Obtenido de http://www.inegi.org.mx/RDE/RDE_05/Doctos/RDE_05_opt.pdf
- Bahadur, R., & Murayama, Y. (2011). Urban growth modeling of Kathmandu metropolitan region, Nepal. *Computers, Environmental and Urban Systems*, 35, 25–34. doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2010.07.005
- Bonham-Carter, G. F. (1994). *Geographic information systems for geoscientists: Modelling with GIS*. New York, USA: Pergamon.
- Champo, O., Valderrama, L., & España, M. L. (2012). Pérdida de cobertura forestal en la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca, Michoacán, México (2006- 2010). *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 18(2), 143–157. doi: 10.5154/r.rchscfa.2010.09.074
- Chuvieco, E. (2008). *Teledetección ambiental: La observación de la Tierra desde el espacio* (3a ed.). Barcelona, España: Editorial Ariel S. A.
- Comisión de la Cuenca de Valle de Bravo-Amanalco de Becerra (2011). *Atlas informático de Valle de Bravo-Amanalco de Becerra*, México. México: Autor.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2008). *Programa Nacional Forestal 2007-2012*. México: Autor.
- Eastman, R. (2009). *IDRISI Taiga: Guide to GIS and image processing. Manual version 16.02*. Worcester, MA, USA: Clark University.
- Environmental Systems Research Institute (ESRI). (2012). ArcMap 10.1. ArcGIS Resource Center. Desktop 10. Redlands, CA, USA: Author. Obtenido de <http://help.arcgis.com/es/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#//006600000001000000>
- Franco, S., Regil, H., & Ordóñez, J. (2006). Dinámica de perturbación-recuperación de las zonas forestales en el Parque Nacional Nevado de Toluca. *Madera y Bosques*, 12(1), 17–28. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61712103>
- Gobierno del Estado de México (2006). Actualización del modelo de ordenamiento ecológico del territorio del Estado de México. Obtenido de http://portal2.edomex.gob.mx/impactoambiental/programas_regionales/ordenamiento_estatal/index.htm
- Godoy, M. M. G., & Soares-Filho, B. S. (2008). Modelling intra-urban dynamics in the Savassi neighbourhood, Belo Horizonte city, Brazil. In M. Paegelow, & M. T. Camacho (Eds.), *Modelling environmental dynamics* (pp. 319–338).

subcuencas hidrográficas río Amanalco y río Molino-Los Hoyos, y de la cuenca hidrográfica Valle de Bravo-Amanalco (incluida en el sistema Cutzamala que provee agua potable al Distrito Federal y Estado de México). El modelo construido representa una herramienta útil para prever los cambios de cobertura y uso de suelo que describen a Amanalco de Becerra, así como los posibles impactos bajo el supuesto referido anteriormente. No obstante, los resultados del modelo no son exactos y deben interpretarse en función de las limitantes correspondientes al enfoque (cuantitativo), los métodos y materiales implementados en este estudio.

Fin de la versión en español

- Germany: Springer-Verlag.
- Hagen, A. (2003). Fuzzy set approach to assessing similarity of categorical maps. *International Journal of Geographical Information Science*, 17(3), 235–249. doi:10.1080/13658810210157822
- Halffter, G. (1964). La entomofauna americana, ideas acerca de su origen y distribución. *Folia Entomológica Mexicana*, 1, 1–108. Obtenido de <http://www.sea-entomologia.org/>
- Halffter, G. (2003). Biogeografía de la entomofauna de montaña de México y América Central. En J. J. Morrone, y J. Llorente-Bousquets (Eds.), *Una perspectiva latinoamericana de la biogeografía* (pp. 87–97). México: Facultad de Ciencias, UNAM.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (1995). *Marco geoestadístico municipal*. México: Autor.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (1996). *Información topográfica digital escala 1:50 000, serie II, año 1993*. México: Autor.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (1997). *Carta de uso del suelo y vegetación 1:250 000*. México: Autor.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (1998). *Información topográfica digital Escala 1:50 000*. México: Autor.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (1999). *Información topográfica digital escala 1:50 000*. México: Autor.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2000). *Información topográfica digital escala 1:50 000*. México: Autor.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2002). *Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación serie III escala 1: 250 000*. México: Autor.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2003). *Datos de relieve*. México: Autor.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2007). *Sistema de consulta de información geoestadística agropecuaria*. México: Autor.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2009). *Información topográfica digital escala 1: 50 000*. México: Autor.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2010a). *Marco geoestadístico estatal*. México: Autor.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2010b).

- Marco geostadístico municipal. México: Autor.
- Juan, P. J. I. (2013a). Análisis del cambio de uso del suelo en una región del Altiplano Mexicano. Retos e impactos: 1986-2011. *Revista OIDLES*, 7(13). Obtenido de <http://www.eumed.net/rev/oidles/13/cambio-uso-suelo.html>
- Juan, P. J. I. (2013b). Manejo de recursos naturales y procesos agrícolas para el turismo rural campesino en un ejido de transición ecológica de México. (Primera parte). *PASOS Revista de Turismo y Patrimonio Cultural*, 11(2), 237–342. Obtenido de <http://www.redalyc.org/pdf/881/88125790005.pdf>
- Lira, J. (2010). Tratamiento digital de imágenes multispectrales (2da. ed.). México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Maeda, E., Almeida, C. M., Carvalho, A., Formaggio, A., Shimabukuro, Y., & Pellikka, P. (2011). Dynamic modeling of forest conversion: Simulation of past and future scenarios of rural activities expansion in the fringes of the Xingu National Park, Brazilian Amazon. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13, 435–446. doi:10.1016/j.jag.2010.09.008
- Mas, J. F., Díaz, J. R., & Pérez, A. (2003). Evaluación de la confiabilidad temática de mapas o de imágenes clasificadas: Una revisión. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 51, 53–72. Obtenido de <http://www.redalyc.org/pdf/569/56905105.pdf>
- Mas, J. F., & Couturier S. (2011). Evaluación de bases de datos cartográficas. En F. Bautista (Ed.), *Técnicas de muestreo para manejadores de recursos naturales* (2da. ed., pp. 675–703). México: Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental-Instituto de Geografía.
- Mas, J. F., & Flamenco, A. (2011). Modelación de los cambios de coberturas/uso del suelo en una región tropical de México. *GeoTrópico*, 5(1), 1–24. Obtenido de http://www.geotropico.org/NS_5_1_Mas-Flamenco.pdf
- Mas, J. F., Kolb, M., Paegelow, M., Camacho, M. T., & Houet, T. (2014). Inductive pattern-based land use/cover change models: A comparison of four software packages. *Environmental Modelling & Software*, 51, 94–111. doi: 10.1016/j.envsoft.2013.09.010
- Organización de la Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (1996). Forest resources assessment 1990. Survey of tropical forest cover and study of change processes. Obtenido de <http://www.fao.org/docrep/007/w0015e/w0015e00.htm>
- Paegelow, M., & Camacho, M. T. (2008). Advances in geomatic simulations. In M. Paegelow, & M. T. Camacho (Eds.), *Modelling environmental dynamics* (pp. 3–54). Germany: Springer-Verlag.
- Pérez, A., Mas, J. F., & Ligmann, A. (2012). Comparing two approaches to land/use cover change modeling and their implications for the assessment of biodiversity loss in a deciduous tropical forest. *Environmental Modelling & Software*, 29, 11–23. doi: 10.1016/j.envsoft.2011.09.011
- Pineda, N., Bosque, J., Gómez, M., & Plata, W. (2009). Análisis de cambio del uso del suelo en el Estado de México mediante sistemas de información geográfica y técnicas de regresión multivariantes. Una aproximación a los procesos de deforestación. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 69, 33–52. Obtenido de <http://www.revistas.unam.mx/index.php/rig/article/view/18003>
- Protectora de Bosques del Estado de México (PROBOSQUE). (2008a). *Programa pago por servicios ambientales. Resultados convocatoria 2007*. México: Autor.
- Protectora de Bosques del Estado de México (PROBOSQUE). (2008b). *Programa pago por servicios ambientales. Resultados convocatoria 2008*. México: Autor.
- Protectora de Bosques del Estado de México (PROBOSQUE). (2009). *Programa pago por servicios ambientales. Resultados convocatoria 2009*. México: Autor.
- Protectora de Bosques del Estado de México (PROBOSQUE). (2010). *Inventario forestal 2010*. México: Secretaría de Desarrollo Agropecuario.
- Rosete, F. A., Pérez, J. L., Villalobos, M., Navarro, E. N., Salinas, E., & Remond, R. (2014). El avance de la deforestación en México. *Madera y Bosques*, 20(1), 21–35. Obtenido de <http://www1.inecol.edu.mx/myb/resumeness/20.1/myb2012135.pdf>
- Smith, H. M. (1949). Herpetogeny in Mexico and Guatemala. *Annals Association American Geographers*, 39(3), 219–238. doi:10.1080/00045604909352007
- Soares-Filho, B. S., Pennachin, C. L., & Cerqueira, G. (2002). DINAMICA – a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. *Ecological Modelling*, 154(3), 217–235. doi:10.1016/S0304-3800(02)00059-5
- Soares-Filho, B. S., Rodrigues, H. O., & Costa, W. L. S. (2009). Modelamiento de dinámica ambiental con Dinamica EGO. Obtenido de http://www.csr.ufmg.br/dinamica/tutorial/Dinamica_EGO_guia_pratica.pdf
- Soares-Filho, B. S., Moutinho, P., Nepstad, D., Anderson, A., Rodrigues, H., Garcia, R., ... Maretti, C. (2010). Role of Brazilian Amazon protected areas in climate change mitigation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, 107(24), 10821–10826. doi: 10.1073/pnas.0913048107
- Veldkamp, A., & Lambin, E. (2001). Predicting land-use change. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 85, 1–6. doi:10.1016/S0167-8809(01)00199-2
- Xiang, W. N., & Clarke, K. C. (2003). The use of scenarios in land-use planning. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 30(6), 885–909. Obtenido de <http://www.geog.ucsb.edu/~kclarke/Papers/XiangClarke.pdf>