

Projection and probability of land use change in Zoquiapan, Mexico: considerations for forest management

Proyección y probabilidad de cambio de uso de suelo en Zoquiapan, México: consideraciones para su manejo forestal

Adriana Paredes-Gonzalez¹; Alejandro I. Monterroso-Rivas^{2*};
Luz J. Rodríguez-Esparza¹; Francisco J. Zamudio-Sánchez³

Universidad Autónoma Chapingo, ¹División de Ciencias Forestales, ²Departamento de Suelos, ³Departamento de Estadística, Matemática y Cómputo. km 38.5 carretera México-Texcoco. C. P. 56230. Chapingo, Texcoco, Estado de México, México.

*Corresponding author: aimrivas@correo.chapingo.mx, tel.: +52 (595) 952 1500 ext. 6178.

Abstract

Introduction: The dynamics of land use and changes in vegetation cover is essential for natural resource management.

Objective: To analyze the land use change in the micro-watershed of Zoquiapan, between 1989 and 2009, and to estimate the change trend for the year 2020.

Materials and methods: Two satellite images (March 21, 2009 and March 7, 1989) were taken, corresponding to the Landsat sensor, and were processed using the software IDRISI®. The classes studied were forest, grassland and agricultural use. The Márkov-Markovian transition estimator command was applied to estimate the stationary vector of the chain between the years of study and to know the future trends of vegetation cover.

Results and discussion: Between 1989 and 2009, the agricultural and grassland area decreased 1.86 and 88.63 ha, respectively; the forest area increased 90.5 ha. By 2020, the micro-watershed of Zoquiapan will have a low probability of change. The probabilities of permanence are 94 % for forest, 88 % for grassland and 91 % for agricultural activities.

Conclusion: The micro-watershed of Zoquiapan has not had any significant land use change. The areas covered by forests have a low probability of change, as long as the conservation efforts carried out so far continue.

Keywords: Vegetation cover, Márkov chains, IDRISI, stable state.

Resumen

Introducción: La dinámica del uso de suelo y cambios de la cubierta vegetal es crucial para la gestión de los recursos naturales.

Objetivo: Analizar el cambio de uso de suelo en la microcuenca Zoquiapan, entre 1989 y 2009, y estimar la tendencia de cambio para el año 2020.

Materiales y métodos: Se obtuvieron dos imágenes de satélite (21 de marzo del 2009 y 7 de marzo de 1989), correspondientes al sensor Landsat, y se procesaron en el software IDRISI®. Las clases estudiadas fueron bosque, pastizal y uso agrícola. Se aplicó el comando *Markov-Markovian transition estimator*, para estimar el vector estacionario de la cadena entre los años de estudio y conocer las tendencias futuras de cobertura vegetal.

Resultados y discusión: Entre 1989 y 2009, la superficie agrícola y de pastizales se redujo 1.86 y 88.63 ha, respectivamente; la superficie forestal incrementó 90.5 ha. Para el año 2020, la microcuenca Zoquiapan tiene baja probabilidad de cambio. Las probabilidades de permanencia son de 94 % para uso forestal, 88 % para el pastizal y 91 % para la actividad agrícola.

Conclusión: La microcuenca Zoquiapan no ha tenido algún cambio significativo de uso de suelo. Las zonas cubiertas por bosques presentan baja probabilidad de cambio, siempre y cuando continúen los esfuerzos de conservación hasta ahora realizados.

Palabras clave: Cobertura vegetal, cadenas de Márkov, IDRISI, estado estable.

Introduction

Land use studies and change of vegetation cover, as well as its dynamics over time, are essential for the sustainable management of natural resources (Memarian et al., 2012). Vegetation cover is essential in the global dynamics of the planet: plants absorb and recycle nutrients such as carbon dioxide, nitrogen, sulfur and phosphorus that are in the atmosphere, retain water and transpire. Forests play an important role in the conservation of the environment, since they regulate water currents, have a moderating effect on the global and local climate, and favor the conservation of soils preventing erosion; in addition, they are home to numerous species of plants and animals (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2009). However, human activities have altered the original uses of the land, modifying the natural landscape and, consequently, the functioning of the ecosystems (Zepeda, Nemiga, Helgueras, & Madrigal, 2012). The land uses associated with anthropic activities, such as agriculture and grazing, have a deep influence on the change of the ecological, hydrological and atmospheric regulation processes of the planet. Therefore, the study of spatial and temporal dynamics of land uses is important (Martínez-Santiago, Alvarado-Segura, Zamudio-Sánchez, & Cristobal-Acevedo, 2017), but even more, to know their trends and projections to suggest interventions that reduce or slow down degradation.

A useful tool for modeling projection and trends of land use change are the Márkov chains (Eastman, 2012; Levin, Peres, & Wilmer, 2009; Memarian et al., 2012). In these, the transition to a next state depends on the current state of the system, regardless of the route to achieve it. The model considers the random variable of states and the parameter t (time) as discrete variables; in this way, it is possible to determine the probability with which the process can enter a certain state (Bedoya & Barrera, 2006). The method is convenient for modeling the change in land use when changes and processes in the landscape are difficult to describe.

Márkov chains simulate the prediction of the state of a system for a given time, from two preceding states (Eastman, 2012). This means that the modeling does not take into account the explanatory and descriptive variables, but is based exclusively on the analysis of the system internal dynamics. One limitation of the algorithm is the need to have the same categories in the time series, so that the disappearance or appearance of some class prevents applying the method (Paegelow, Teresa, & Minor, 2003). Markov models have been widely used in studies on land cover change at various spatial scales (Sanchayeeta & Southworth, 2012); according to Memarian et al. (2012), models are easy to create with minimum data requirements and are based on a transition matrix.

Introducción

Los estudios de uso de suelo y cambio de la cubierta vegetal, así como su dinámica en el tiempo, son cruciales para la gestión y manejo sostenible de los recursos naturales (Memarian et al., 2012). Las coberturas vegetales son esenciales en la dinámica global del planeta: las plantas absorben y reciclan nutrientes, dióxido de carbono, nitrógeno, azufre y fósforo que están en la atmósfera, captan agua y transpiran. Los bosques juegan un papel importante en la conservación del ambiente, ya que regulan las corrientes de agua, tienen un efecto moderador en el clima a nivel mundial y local, y favorecen la conservación de los suelos previniendo la erosión; además, son el hogar de numerosas especies de plantas y animales (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2009). Sin embargo, las actividades humanas han alterado los usos originales del suelo, modificando el paisaje natural y, por consiguiente, el funcionamiento de los ecosistemas (Zepeda, Nemiga, Helgueras, & Madrigal, 2012). Los usos del suelo asociados con actividades antrópicas, como la agricultura y el pastoreo, tienen una profunda influencia en el cambio de los procesos ecológicos, hidrológicos y de regulación atmosférica del planeta. Por tanto, el estudio de la dinámica espacial y temporal de los usos de suelo es importante (Martínez-Santiago, Alvarado-Segura, Zamudio-Sánchez, & Cristobal-Acevedo, 2017), pero más aún, conocer sus tendencias y proyecciones, para sugerir intervenciones que disminuyan o frenen la degradación.

Una herramienta útil en el modelado de proyección y tendencias de cambio de uso de suelo son las cadenas de Márkov (Eastman, 2012; Levin, Peres, & Wilmer, 2009; Memarian et al., 2012). En estas, la transición a un estado siguiente depende del estado presente en que se encuentre el sistema, sin importar el recorrido para lograrlo. El modelo considera la variable aleatoria de estados y el parámetro t (tiempo) como variables discretas; de este modo, es posible determinar la probabilidad con la cual el proceso puede entrar en algún estado determinado (Bedoya & Barrera, 2006). El método es conveniente para modelar el cambio de uso del suelo cuando los cambios y procesos en el paisaje son difíciles de describir.

Las cadenas de Márkov simulan la predicción del estado de un sistema para un tiempo determinado, a partir de dos estados precedentes (Eastman, 2012). Esto significa que la modelización no toma en cuenta las variables explicativas y descriptivas, sino que se basa exclusivamente en el análisis de la dinámica interna del sistema. Una limitación del algoritmo es la necesidad de tener las mismas categorías en las series temporales, de tal forma que la desaparición o aparición de alguna clase impide aplicar el método (Paegelow, Teresa, & Menor, 2003). Los modelos de Márkov han sido

In the case of Mexico, Markov chains have been used in migration studies (Garrocho, Jiménez-López, & Álvarez-Lobato, 2016), demographic projections (Partida, 1989), financial investments (Torres, Gaytán, & Tinoco, 2017), livestock diseases (Rojas, Barajas, Riemann, & Franti, 1993) and air quality (Hoyos, Lara, Ortíz, López, & González, 2009). In the case of land use change studies, recent cases are known in Texcoco (Pérez, Valdez, Moreno, González, & Valdez, 2012), Morelia (López, Bocco, & Mendoza, 2001) and Hidalgo (Reynoso, Valdez, Escalona, de los Santos, & Pérez, 2016). The purpose of the present study was to analyze the land use change in the micro-watershed of Zoquiapan in the period 1989-2009, through the Stochastic Markov chains process, to estimate the trend of land use change in the year 2020 and find the transition matrix of the stable state. According to the proposed territorial ecological order made by Lomas-Barrié, Terrazas-Domínguez, and Tchikoué-Maga (2005), Zoquiapan covers a portion of the Park known as Parque Nacional Zoquiapan y Anexas, which has serious problems of ecological imbalance, environmental degradation, as well as a low sustainability of the environment.

Materials and methods

Study area

The study area included the micro-watershed of Zoquiapan of the Parque Nacional Zoquiapan, located in the 18th hydrographic region of the river Balsas over the watershed of the river Atoyac. The micro-watershed is located at the extreme UTM coordinates 2137115 to the North, 2122190 to the South, 544888 to the East and 532075 to the West; it has an area of 8 087 ha in the municipalities of Ixtapaluca, Chalco and Tlalmanalco in Estado de México, as well as in Tlahuapan and San Salvador el Verde in Puebla.

The micro-watershed has complex relief and heights that vary from 2 400 to 4 642 m, which means a gradient of more than 2 000 m. The volcanic origin is dominant with extrusive igneous class deriving in deep andosol soils, but it is possible to find very thin soils like lithosols in some small surfaces. The dominant climates are semi-cold of the temperate group with fresh and long summer. The annual rainfall varies from 1 000 to 1 500 mm, while the mean temperature ranges between 10 and 14 °C, although it is possible to find places with 5 to 10 °C (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2009, 2013, 2014).

The above characteristics are reflected in the dominant land uses. According to the Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI, 2005) there are seven categories: fir forest, pine forest, pine-oak forest, induced grassland, fir forest with secondary vegetation, montane grasslands and agricultural uses.

utilizados ampliamente en estudios sobre el cambio de cobertura terrestre en varias escalas espaciales (Sanchayeeta & Southworth, 2012); de acuerdo con Memarian et al. (2012), los modelos son fáciles de crear con requisitos mínimos de datos y se basan en una matriz de transición.

En el caso de México, las cadenas de Markov se han utilizado en estudios de migración (Garrocho, Jiménez-López, & Álvarez-Lobato, 2016) proyecciones demográficas (Partida, 1989), inversiones financieras (Torres, Gaytán, & Tinoco, 2017), enfermedades de ganado (Rojas, Barajas, Riemann, & Franti, 1993) y calidad del aire (Hoyos, Lara, Ortíz, López, & González, 2009). En el caso de los estudios sobre cambio de uso de suelo se conocen casos recientes en Texcoco (Pérez, Valdez, Moreno, González, & Valdez, 2012), Morelia (López, Bocco, & Mendoza, 2001) e Hidalgo (Reynoso, Valdez, Escalona, de los Santos, & Pérez, 2016). El propósito del presente estudio fue analizar el cambio de uso de suelo en la microcuenca Zoquiapan en el periodo 1989-2009, por medio del proceso estocástico cadenas de Markov, para estimar la tendencia de cambio de uso de suelo en el año 2020 y encontrar la matriz de transición del estado estable. De acuerdo con la propuesta de ordenamiento ecológico territorial elaborada por Lomas-Barrié, Terrazas-Domínguez, y Tchikoué-Maga (2005), Zoquiapan cubre una porción del Parque Nacional Zoquiapan y Anexas, el cual tiene graves problemas de desequilibrio ecológico, degradación ambiental, así como una baja sustentabilidad del medio ambiente.

Materiales y métodos

Área de estudio

El área de estudio abarcó la microcuenca Zoquiapan del Parque Nacional Zoquiapan, ubicada en la región hidrográfica XVIII del río Balsas sobre la cuenca del río Atoyac. La microcuenca se encuentra en las coordenadas UTM extremas 2137115 al Norte, 2122190 al Sur, 544888 al Este y 532075 al Oeste; tiene una superficie de 8 087 ha en los municipios de Ixtapaluca, Chalco y Tlalmanalco en el Estado de México, así como en Tlahuapan y San Salvador el Verde en Puebla.

La microcuenca tiene relieve complejo y alturas que varían de 2 400 hasta 4 642 m, lo que significa un gradiente mayor a 2 000 m. El origen volcánico es dominante con clase ígnea extrusiva derivando en suelos profundos del tipo andosol, pero es posible encontrar suelos muy delgados como litosoles en algunas pequeñas superficies. Los climas dominantes son semifríos del grupo de los templados con verano fresco y largo. La lluvia anual varía de 1 000 a 1 500 mm, mientras que la temperatura media oscila entre 10 y 14 °C, aunque es posible encontrar lugares con 5 a

The management program of the same year shows that four vegetation associations predominate: association of fir *Abies religiosa* (Kunth) Schltld. & Cham., association of *Alnus firmifolia* Fernald, association of *Pinus hartwegii* Lindl. and association of *P. hartwegii*-*A. firmifolia*.

Projection and probability of land use change in Zoquiapan

The analysis began with two satellite images of different dates, corresponding to the Landsat sensor (available at <http://gldf.umd.edu/>). The images with the best quality and low cloudiness were those of March 21, 2009 and March 7, 1989, both with a resolution of 25 m. The images were processed with the software IDRISI© (Eastman, 2012), where a false color combination was first made using bands 1, 2 and 3. Later, an unsupervised classification was made with the same number of previously known classes: forest, grassland and agricultural use. The process was repeated for both images with the care of having the same area of the studied area, resolution and number of classes. The forest class consisted of tree species such as fir, pine, oak and their associations. The grassland class refers to vegetation communities predominating pastures with few trees and shrubs that can be produced by the clearing of wooded land. It is also possible to find montane grasslands, predominating *Lupinus montanus* Kunth, *Agrostis*, *Festuca* and *Muhlenbergia*. The agricultural class refers to rain-dependent agricultural activities for annual production, known mainly as maize under rainfed conditions.

Following the methodology of Eastman (2012) the Markovian transition estimator was applied in the software IDRISI© in order to know the transition matrix of land uses in the micro-watershed of Zoquiapan, regarding the period 1989-2009, to project the use of soil in the year 2020 with an error of 5 %. According to Levin et al. (2009), when i and j are two states of a Markov chain, the probability will be given by $P(X_{n+1} = j | X_n = i)$, denoted by $p_{ij}(n, n+1)$ which represents the transition probability from state i at time n , to state j at time $n+1$. These probabilities are known as one-step transition probabilities. When the probabilities $p_{ij}(n, n+1)$ do not depend on n , it is said that the chain is stationary or homogeneous in time. For simplicity, such situation is assumed so that the one-step transition probabilities are written as p_{ij} . For example, by varying the indices i and j over the set of states $\{0, 1, 2\}$ we obtain the transition probability matrix as follows:

$$P = \begin{pmatrix} p_{00} & p_{01} & p_{02} \\ p_{10} & p_{11} & p_{12} \\ p_{20} & p_{21} & p_{22} \end{pmatrix}$$

10 °C (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2009, 2013, 2014).

Las características anteriores se reflejan en los usos de suelo dominantes. De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI, 2005) hay siete categorías: bosque de oyamel, bosque de pino, bosque de pino-encino, pastizal inducido, bosque de oyamel con vegetación secundaria, pradera de montaña y usos agrícolas. En el programa de manejo del mismo año se indica que dominan cuatro asociaciones vegetales: asociación de oyamel *Abies religiosa* (Kunth) Schltld. & Cham., asociación de aile *Alnus firmifolia* Fernald, asociación de *Pinus hartwegii* Lindl. y asociación de *P. hartwegii* - *A. firmifolia*.

Proyección y probabilidad de cambio de uso de suelo en Zoquiapan

El análisis inició con la obtención de dos imágenes de satélite de diferentes fechas, correspondientes al sensor Landsat (disponible en <http://gldf.umd.edu/>). Las imágenes seleccionadas con mejor nitidez y baja nubosidad fueron las del 21 de marzo del 2009 y 7 de marzo de 1989, ambas con resolución de 25 m. Las imágenes se procesaron en el software IDRISI© (Eastman, 2012), donde primero se hizo una combinación en falso color utilizando las bandas 1, 2 y 3. Después se hizo una clasificación no supervisada con el mismo número de clases conocidas previamente: bosque, pastizal y uso agrícola. El proceso se repitió para ambas imágenes con el cuidado de tener la misma superficie del área estudiada, resolución y número de clases. La clase forestal estuvo constituida por especies arbóreas como oyamel, pino, encino y sus asociaciones. La clase pastizal se refiere a comunidades vegetales donde predominan los pastos con pocos árboles y arbustos que pueden ser producto del desmonte de terrenos boscosos, también es posible encontrar zacatonal montano, donde *Lupinus montanus* Kunth, *Agrostis*, *Festuca* y *Muhlenbergia* dominan. La clase agrícola se refiere a actividades agrícolas dependientes de la lluvia para la producción anual, conocida principalmente como agricultura de temporal de maíz.

Siguiendo la metodología de Eastman (2012) se aplicó el comando *Markovian transition estimator* en el software IDRISI© con el fin de conocer la matriz de transición de los usos de suelo en la microcuenca Zoquiapan, considerando el periodo 1989-2009, para proyectar el uso de suelo en el año 2020 con un error de 5 %. Según Levin et al. (2009) cuando sean i y j dos estados de una cadena de Márkov, la probabilidad estará dada por $P(X_{n+1} = j | X_n = i)$, denotada por $p_{ij}(n, n+1)$ que representa la probabilidad de transición del estado i en el tiempo n , al estado j en el tiempo $n+1$. Estas probabilidades se conocen como las probabilidades de transición en un

The input (i, j) of this matrix is the transition probability (ij) ; in other words, the probability of moving from state i to state j in a unit of time. A state is stable when there are no changes in the system; that is, equilibrium is reached. A possible way to obtain the stable state of the system is to repeat the calculations iteratively for each period in order to find the one that has those probabilities that remain constant or do not change (Levin et al., 2009).

When the Markov chains are applied, first we have to check whether the chain reaches the steady state. Since the observations that are generated are dependent, we have to wait for the chain to stabilize. This means that a certain number of iterations must be run as a “warm-up period” in the chain and then estimate their seasonality and convergence. In order to have an idea of a stationary state is being reached; the simplest thing is to make some graphs. For example, averages of some function of interest could be plotted, such as $\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k h(x_i)$, which by the ergodic theorem, should be placed around $E(h(X))$ as n grows. In this case, the transition matrix was generated for the year 2010 to find the stationary distribution, and we obtained the initial probabilities (p_i) with the land use data of 2009 and 10 000 iterations of a Markov chain were made at discrete time using the program R (R Development Core Team, 2016). Then the ergodic mean of this process (dimensionless) was estimated. Once the stationary vector was obtained, by means of the ergodic mean, as has been discussed in other studies (Bouchard-Côté, Vollmer, & Doucet, 2017; Saldi, Linder, & Yüksel, 2013), a random data was taken by every 10 observations to obtain a sample of 1 000 and estimate their respective transition matrix using the program IDRISI©. As a result, the analyzed period comprised 20 years and three categories of land use: forest, grassland and agricultural use, and a one-year estimate with an error range of 0.05. That is, the transition matrix for the year 2010 has as reference data the land use classifications for the year 2009, to achieve an error prediction of 5 %.

Results and discussion

Projection and probability of land use change in Zoquiapan

Figure 1 shows the satellite images of the years 1989 and 2009, where it is observed that the dominant land use is forest followed by grassland and agricultural use. This was also found by Virgen-Cobos (2016), who points out that the associations of species in the Zoquiapan Forest Station are fir, pine, pine-*Alnus firmifolia*, pine-oak and pine-fir.

In Figure 1, the use of bare soil refers to the area without vegetation cover (203 ha), near the Iztaccíhuatl volcano.

paso. Cuando las probabilidades $p_{ij}(n, n+1)$ no dependen de n , se dice que la cadena es estacionaria u homogénea en el tiempo. Por simplicidad se asume tal situación de modo que las probabilidades de transición en un paso se escriben como p_{ij} . Por ejemplo, variando los índices i y j sobre el conjunto de estados $\{0, 1, 2\}$ se obtiene la matriz de probabilidades de transición:

$$P = \begin{pmatrix} p_{00} & p_{01} & p_{02} \\ p_{10} & p_{11} & p_{12} \\ p_{20} & p_{21} & p_{22} \end{pmatrix}$$

La entrada (i, j) de esta matriz es la probabilidad de transición (ij) ; en otras palabras, la probabilidad de pasar del estado i al estado j en una unidad de tiempo. Un estado es estable cuando ya no hay cambios en el sistema; es decir, se alcanza el equilibrio. Una manera posible de obtener la condición estable del sistema es repetir los cálculos iterativamente para cada periodo con el fin de hallar el que cuente con aquellas probabilidades que se mantengan constantes o no cambien (Levin et al., 2009).

Cuando se aplican las cadenas de Márkov primero se debe verificar si la cadena alcanza el estado estacionario. Como las observaciones que se generan son dependientes, se debe dar tiempo para que la cadena se estabilice. Esto significa que se debe correr cierto número de iteraciones como “periodo de calentamiento” en la cadena y después obtener su estacionalidad y convergencia. Para tener una idea de sí se está alcanzando un estado estacionario, lo más sencillo es realizar algunas gráficas. Por ejemplo, podrían graficarse promedios de alguna función de interés, tal como $\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k h(x_i)$, que por el teorema ergódico, deberían situarse alrededor de $E(h(X))$ a medida que n crece. En este caso, para encontrar la distribución estacionaria se generó la matriz de transición para el año 2010, se obtuvieron las probabilidades iniciales (p_i) con los datos de uso de suelo de 2009 y se realizaron 10 000 iteraciones de una cadena de Márkov a tiempo discreto utilizando el programa R (R Development Core Team, 2016). Después se calculó la media ergódica de dicho proceso (adimensional). Una vez obtenido el vector estacionario -por medio de la media ergódica como se ha tratado en otros estudios (Bouchard-Côté, Vollmer, & Doucet, 2017; Saldi, Linder, & Yüksel, 2013)-, se tomó un dato al azar por cada 10 observaciones, para obtener una muestra de 1 000 y estimar su respectiva matriz de transición en el programa IDRISI©. En consecuencia, el lapso analizado comprendió 20 años y tres categorías de uso de suelo: forestal, pastizal y agrícola, y una estimación a un año con un rango de error de 0.05. Esto es, la matriz de transición para el año 2010 tiene como datos de referencia las clasificaciones de uso de suelo del año 2009, para lograr una predicción con error del 5 %.

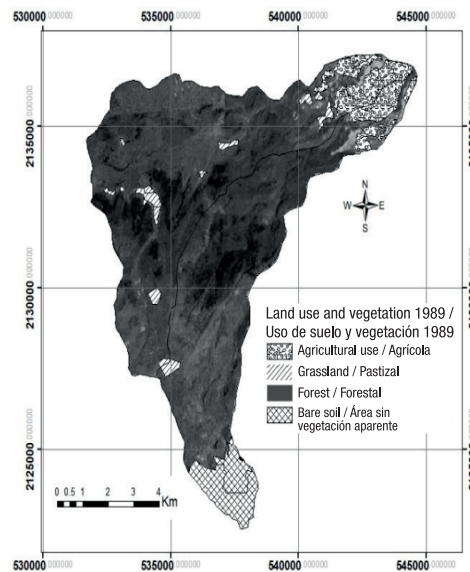


Figure 1. Classification of land use and vegetation in the micro-watershed of Zoquiapan, based on the satellite images of 1989 (top image) and 2009 (bottom image).

Figura 1. Clasificación de uso de suelo y vegetación en la microcuenca Zoquiapan, con base en las imágenes satelitales de 1989 (superior) y 2009 (inferior).

According to the results, in the 20 years studied, the agricultural area was reduced 1.86 ha; that is to say, it remained practically the same in the period 1989-2009. It should be noted that in the first year there were 522 hectares that corresponded to 6.45 % of the surface area. In terms of grassland, the surface area was also reduced 88.63 ha, going from 208.3 ha, which corresponded to 2.5 % of the micro-watershed of Zoquiapan, to 119.7 ha. The use of forest land, consequently, increased its surface area by practically 90.5 ha, as shown in Table 1.

The results are similar to those obtained a few years ago. According to the analysis on land use change carried out by Lomas-Barrié et al. (2005), in general, the vegetation cover remained unchanged during the period from 1977 to 2000. The vegetation covers that were best maintained were the mixed forest, grassland and *Abies* forest. For its part, the Mexican Civil Council for Sustainable Silviculture (CCMSS, 2008) indicated that, in the period 2000-2007, agriculture in the area of influence of the park Izta-Popo lost 28 hectares of agricultural area, approximately, and that changes in land use were detected in only 1.35 % of the surface. In this way, with the results obtained in this study, it is possible to point out that the area of Zoquiapan has not had any aggressive change in land use since 1977, year of the first studies with satellite images.

According to Villegas, Muñoz, Muñoz, Gallo, and Ponce (2011), due to the legal practices of conservation of protected natural areas, transformation rates are low

Resultados y discusión

Proyección y probabilidad de cambio de uso de suelo en Zoquiapan

La Figura 1 muestra las imágenes satelitales de los años 1989 y 2009, donde se observa que el uso de suelo dominante es el forestal seguido por el pastizal y el agrícola. Esto mismo lo encontró Virgen-Cobos (2016), quien señala que las asociaciones de especies presentes en la Estación Forestal Zoquiapan son oyamel, pino, pino-aile, pino-encino y pino-oyamel.

En la Figura 1, el uso de suelo sin vegetación se refiere a la superficie sin cobertura (203 ha), cercana al volcán Iztaccíhuatl. De acuerdo con los resultados, en los 20 años estudiados, el área agrícola se redujo 1.86 ha; es decir, permaneció prácticamente igual en el periodo 1989-2009. Cabe señalar que en el primer año se tenían 522 ha que correspondían a 6.45 % de la superficie. En lo que se refiere a los pastizales, la superficie también se redujo 88.63 ha al pasar de 208.3 ha, que correspondían a 2.5 % de la microcuenca Zoquiapan, a 119.7 ha. El uso de suelo forestal, en consecuencia, incrementó su superficie en prácticamente 90.5 ha, como se observa en el Cuadro 1.

Los resultados son similares a los obtenidos hace algunos años. De acuerdo con el análisis sobre el cambio de uso del suelo elaborado por Lomas-Barrié et al. (2005), en general, la cobertura vegetal se mantuvo

Table 1. Surface occupied by land use and vegetation in the micro-watershed of Zoquiapan in the years 1989 and 2009. Cuadro 1. Superficie ocupada por uso de suelo y vegetación en la microcuenca Zoquiapan en los años 1989 y 2009.

Soil use / Uso de suelo	1989		2009		Difference 1989-2009 / Diferencia 1989-2009	
	ha	%	ha	%	ha	%
Agricultural use / Agrícola	523.78	6.47	521.91	6.45	-1.86	-0.02
Grassland / Pastizal	208.39	2.57	119.76	1.48	-88.63	-1.09
Forest / Forestal	7 052.37	87.22	7 142.87	88.32	90.49	1.11
Bare soil / Área sin vegetación	302.60	3.74	302.60	3.75	0	0
Total	8 087.16	100.00	8 087.16	100.00	0	0

compared to unprotected areas. The micro-watershed of Zoquiapan is located within two subzones of management of the National Park: recovery subzone and preservation subzone (SEMARNAT, 2013). In these subzones, some of the unauthorized activities related to the modification of vegetation cover are the following: opening trails, gaps or roads; forest harvesting, except for scientific collection and domestic use; build public and private works; damage, cut and mark trees, except for scientific research activities; extract living or dead flora and fauna, as well as other biogenetic elements, except for self-consumption or scientific collection; livestock, including grazing; carry out hunting or exploitation activities of wild flora and fauna species without authorization, except for the use of natural resources for self-consumption purposes.

Another factor for which there is a low probability of land use change is the constant reforestations during the analysis period. According to the Manifestation of Environmental Impact of the Management Program for the Harvesting of Dead Trees, a reforestation was done in the year 2004 of the order of 10 ha and it was proposed to reforest 65.4 ha for the year 2006 (Universidad Autónoma Chapingo, 2005). Subsequently, in April 2010, and following a technical study due to the environmental contingency of the National Park Izta-Popo, Zoquiapan y Anexas, the SEMARNAT indicated the execution of reforestation work. This was done with native species at random, with homogeneous distancing that avoided competition between them and with forest density of 1 600 plants·ha⁻¹; the clearings smaller than 100 m² were also reforested. It is worth mentioning that this study proposed reforestation for three consecutive years in 325 ha (Tejada-Nichols, 2010).

Table 2 shows the results of the transition by type of dominant land use. The transition matrix analyzes the information of the years 1989 and 2009, to be used later in the projection for the year 2020. The above regarding

sin cambios durante el periodo de 1977 a 2000. Las cubiertas vegetales que mejor se mantuvieron fueron el bosque mixto, pastizal y el bosque de *Abies*. Por su parte, el Consejo Civil Mexicano para la Silvicultura Sostenible (CCMSS, 2008) indicó que, en el periodo 2000-2007, la agricultura en la zona de influencia del parque Izta-Popo perdió 28 ha de superficie agrícola, aproximadamente, y que se detectaron cambios de uso de suelo en tan solo 1.35 % de la superficie. De este modo, con los resultados obtenidos en el presente trabajo, es posible señalar que el área de Zoquiapan no ha tenido algún cambio agresivo de uso de suelo desde 1977, año de los primeros estudios con imágenes de satélite.

De acuerdo con Villegas, Muñoz, Muñoz, Gallo, y Ponce (2011), debido a las prácticas legales de conservación de áreas naturales protegidas, las tasas de transformación son bajas en comparación con las áreas sin protección. La microcuenca Zoquiapan se encuentra dentro de dos subzonas de manejo del Parque Nacional: subzona de recuperación y subzona de preservación (SEMARNAT, 2013). En estas subzonas, algunas de las actividades no autorizadas y relacionadas con la modificación de la cobertura vegetal son las siguientes: abrir senderos, brechas o caminos; aprovechamiento forestal, salvo para colecta científica y uso doméstico; construir obras públicas y privadas; dañar, cortar y marcar árboles, salvo para las actividades de investigación científica; extraer flora y fauna viva o muerta, así como otros elementos biogenéticos, salvo para autoconsumo o colecta científica; ganadería, incluyendo el pastoreo; realizar actividades cinegéticas o de explotación de especies de flora y fauna silvestres sin autorización, salvo para el aprovechamiento de recursos naturales con fines de autoconsumo.

Otro factor por el cual hay baja probabilidad de cambio de uso de suelo son las reforestaciones constantes durante el periodo de análisis. De acuerdo con la Manifestación

that the conditions external to the analysis remain similar to those observed. According to the matrix, it is observed that the probability of the forest remaining as such by 2020 is 94 % (in 5 613 ha). The probability that grassland is maintained is 88 % (in 874 ha), while that of the agricultural area is 91 % (in 284 ha). That suggests that there are high probabilities that current uses will remain; that is, if we continue with the current trend, we can expect that the dominant vegetation covers will be maintained by the year 2020.

de Impacto Ambiental del Programa de Manejo para el Aprovechamiento de Arbolado Muerto, se hizo una reforestación en el año 2004 del orden de 10 ha y se propuso reforestar 65.4 ha para el año 2006 (Universidad Autónoma Chapingo, 2005). Posteriormente, en abril del año 2010, y en seguimiento a un estudio técnico por contingencia ambiental del Parque Nacional Izta-Popo, Zoquiapan y Anexas, la SEMARNAT indicó la ejecución de labores de reforestación. Esta se hizo con especies nativas al azar, con distanciamiento homogéneo que

Table 2. Probability of change or permanence between land uses in the micro-watershed of Zoquiapan for the year 2020.

Cuadro 2. Probabilidad de cambio o permanencia entre usos de suelo en la microcuenca Zoquiapan, para el año 2020.

Soil use / Uso de suelo	Forest / Forestal	Grassland / Pastizal	Agricultural / Agrícola
Forest / Forestal	0.9454	0.0546	0.0000
Grassland / Pastizal	0.0556	0.8875	0.0569
Agricultural use / Agrícola	0.0000	0.0900	0.9100

With respect to the changes, they are not projected from an agricultural use to the forest or vice versa. This can be attributed to the conservation of the majority of the surface analyzed. The population near the area of Zoquiapan recognizes the value of forest ecosystems in the provision of environmental services. On the other hand, the change of use from agricultural land to grassland is the most likely, with 9 % for 324 ha. This may be explained when an agricultural plot is abandoned, because a process of ecological succession begins and the land is initially covered by grass.

Figure 2 shows the behavior of the ergodic average; it is observed that the stable period is reached after the 400 iterations. The estimation of the ergodic average averages the states of the Márkov chain (forest, grassland or agriculture) every 10 iterations and graphs them to make visible the moment in which these states converge and stop changing. The values shown in Table 2 come from the stable state, which was reached after 600 iterations in the ergodic average.

As pointed out a few years ago by Orantes and Musálem (1982), who considered 50-year-old trees in their study, the experimental field of Zoquiapan has trees of medium to high quality with heights of more than 20 m. Over the years and in accordance with the conservation efforts made in the area, in this study it was found that the vegetation covers have remained practically unchanged. However, the region is susceptible to

evitar la competencia y con densidad forestal de 1 600 plantas·ha⁻¹; también se reforestaron los claros menores de 100 m². Cabe mencionar que dicho estudio planteó la reforestación durante tres años consecutivos en 325 ha (Tejada-Nichols, 2010).

El Cuadro 2 presenta los resultados de transición por tipo de uso de suelo dominante. La matriz de transición analiza la información de los años 1989 y 2009, para ser usadas después en la proyección al año 2020. Lo anterior considerando que las condiciones externas al análisis se mantengan similares a las observadas. De acuerdo con la matriz se observa que la probabilidad de que el bosque permanezca como tal para el año 2020 es de 94 % (en 5 613 ha). La probabilidad de que el pastizal se mantenga es de 88 % (en 874 ha), mientras que la del área agrícola es de 91 % (en 284 ha). Lo anterior sugiere que hay probabilidades elevadas de que los usos actuales permanezcan; es decir, de seguir con la tendencia actual, se espera que las coberturas dominantes se mantengan para el año 2020.

En lo que se refiere a los cambios, no se proyectan de un uso agrícola hacia el forestal ni viceversa. Esto se puede atribuir al carácter de conservación de la mayoría de la superficie analizada. La población cercana al área de Zoquiapan reconoce el valor de los ecosistemas forestales en la prestación de servicios ambientales. Por otra parte, el cambio de uso de suelo agrícola a pastizales es el de mayor probabilidad, con 9 % para

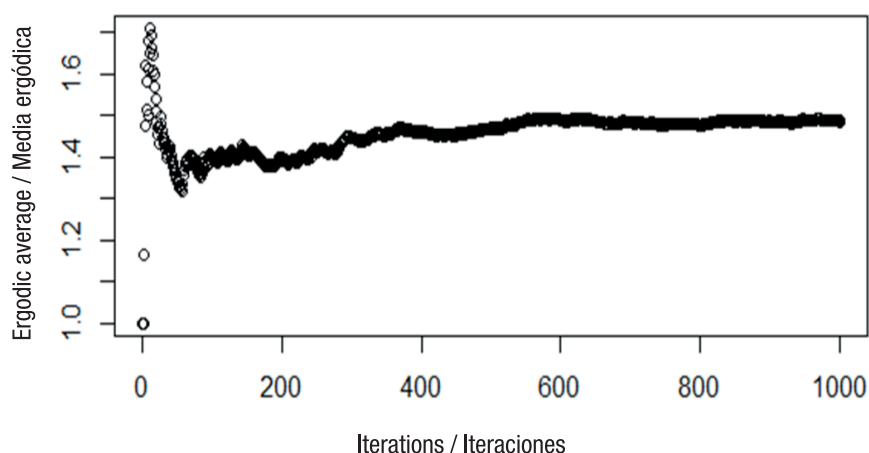


Figure 2. Ergodic average of 1 000 iterations of a Márkov chain at discrete time.

Figura 2. Media ergódica de 1 000 iteraciones de una cadena de Márkov a tiempo discreto.

forest fires (Castañeda, Endara, Villers, & Nava, 2015; Rodríguez Trejo, 2001) and even to clandestine logging and pest attacks (SEMARNAT, 2013).

Considerations for forest management of the micro-watershed of Zoquiapan

The forest area analyzed is within the subzones of preservation and public use of the National Park Iztaccíhuatl-Popocatepetl, where forest harvesting is not allowed, except for scientific collection and domestic use. However, there is a manifestation of environmental impact that allows selective felling of dead trees with the purpose of maintaining phytosanitary conditions of the forest (Universidad Autónoma Chapingo, 2005). In this sense, it is recommended to reforest with native species to maintain the vegetation cover, because it is an area susceptible to water erosion due to the factor that is pending that is higher than 26 %. It is also recommended to make firebreaks and implement forest cleanup and sanitation plans. The conservation of the area is a priority, since in the ravines the blue juniper (*Juniperus monticola* fo. *compacta* Martínez), is distributed, a species under special protection in accordance with the NOM-059-SEMARNAT-2010 (SEMARNAT, 2010).

The grassland area is located in the public use subzone of the National Park Iztaccíhuatl-Popocatepetl, where livestock is not allowed. However, this activity, although of low impact, it is carried out, so it is necessary to establish a grassland management program by means of restoration and recovery of the vegetation cover.

In the agricultural areas, the slope is moderate so it is recommended to implement soil and water conservation practices, such as conservation tillage, terraces, contour furrowing and rotation of crops.

324 ha. Esto quizá se explica en el momento en que se abandona una parcela agrícola, ya que comienza un proceso de sucesión ecológica y los terrenos son cubiertos inicialmente por los pastos.

La Figura 2 muestra el comportamiento de la media ergódica; se observa que el periodo estable se alcanza después de las 400 iteraciones. La estimación de la media ergódica promedia los estados de la cadena de Márkov (bosque, pastizal o agricultura) cada 10 iteraciones y los grafica para hacer visible el momento en el cual dichos estados convergen y dejan de cambiar. Los valores presentados en el Cuadro 2 provienen del estado estable, el cual se alcanzó después de 600 iteraciones en la media ergódica.

Como fue señalado hace algunos años por Orantes y Musálem (1982), quienes consideraron en su estudio árboles de 50 años de edad, el campo experimental Zoquiapan presenta arbolado de calidad media a alta con alturas de más de 20 m. Con el paso de los años y de acuerdo con los esfuerzos de conservación que se han realizado en la zona, en la presente investigación se constató que las coberturas han permanecido prácticamente sin cambio. No obstante, la región es susceptible a incendios forestales (Castañeda, Endara, Villers, & Nava, 2015; Rodríguez Trejo, 2001) e incluso a cortas clandestinas de madera y ataque de plagas (SEMARNAT, 2013).

Consideraciones para el manejo forestal de la microcuenca Zoquiapan

El área forestal analizada se encuentra dentro de las subzonas de preservación y uso público del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl, donde el aprovechamiento forestal no está permitido, salvo para colecta científica y uso doméstico. Sin embargo,

It should be noted that the agricultural area is not within the limits of the National Park Iztaccíhuatl-Popocatepetl (SEMARNAT, 2013).

A problem that has not been eradicated is the extensive livestock farming that causes overgrazing, affecting natural regeneration. An alternative could be the definition of suitable agroforestry areas for such activity and promote a sustainable management that considers the carrying capacity. The exclusion of grazing areas requires enclosing areas conducive to natural regeneration. According to Serrada (2003), soil compaction is a factor that hinders natural regeneration, since it prevents contact of the seed with the mineral soil and proper rooting. The presence of organic waste, leaf litter and twigs also avoid the contact of the seed with soil, as well as the presence of the dense herbaceous cover that, in addition, causes competition between species. The favorable conditions for natural regeneration can be created by soil improvement actions that reduce their compaction, such as scarification and controlled burning.

On the other hand, it is suggested to reforest with native species those areas with low forest density, to increase it up to 1 600 plants per hectare. The growth of forests leads to an increase in interception rates and a greater infiltration of moisture in soils; also, a balanced structure of the stands provides habitat for wildlife, contributing to the increase in biodiversity.

According to Aguirre (1997) it is important to keep dying trees, dead trees and large fallen trees to preserve the species associated with them, which can be distributed in a fraction of the stand forming copses. It also indicates the prevention of forest fires by reducing the accumulation of combustible materials and the use of firebreaks, black lines, pruning, clearing, thinning or prescribed burns.

Finally, it is important that the Forest Station of Zoquiapan continues with its fundamental objectives of teaching, research, conservation and, above all, sustainable management of natural resources.

Conclusions

According to the results, for 2020, the areas covered by forests within the micro-basin of Zoquiapan will have a low probability of land use change. The aforementioned as long as the efforts that so far are made to conserve the site continue. Areas covered with grassland and used for agricultural activities also have a low probability of change. Specifically, and considering the results of the transition matrix as stable state, the probabilities of permanence of land uses are 94 % for forest, 88 % for grassland and 91 % for agricultural activities. The

existe una manifestación de impacto ambiental que permite hacer cortas selectivas de arbolado muerto con el propósito de mantener las condiciones fitosanitarias del bosque (Universidad Autónoma Chapingo, 2005). En este sentido, se recomienda hacer reforestaciones con especies nativas para mantener la cobertura vegetal, debido a que es un área susceptible a la erosión hídrica por el factor pendiente que es superior al 26 %. También se recomienda hacer brechas cortafuego e implementar planes de limpia y saneamiento forestal. La conservación de la zona es prioritaria, ya que en las cañadas se distribuye el enebro azul (*Juniperus monticola* fo. *compacta* Martínez), especie bajo protección especial de acuerdo con la NOM-059-SEMARNAT-2010 (SEMARNAT, 2010).

El área de pastizal se encuentra en la subzona de uso público del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl, donde la ganadería no está permitida. No obstante, esta actividad, aunque de bajo impacto, se realiza abiertamente, por lo que es necesario establecer un programa de manejo del pastizal por medio de la restauración y recuperación de la cubierta vegetal.

En las áreas agrícolas, la pendiente es moderada por lo que se recomienda implementar prácticas de conservación de suelo y agua, como labranza de conservación, terrazas, surcados al contorno y rotación de cultivos. Cabe señalar que el área agrícola no se encuentra dentro de los límites del Parque Nacional Iztaccíhuatl y Popocatepetl (SEMARNAT, 2013).

Una problemática que no se ha logrado erradicar es la ganadería extensiva que causa sobrepastoreo, afectando la regeneración natural. Una alternativa podría ser la definición de áreas agroforestales aptas para tal actividad e impulsar un manejo sustentable que considere la capacidad de carga. La exclusión de áreas al pastoreo requiere cercar zonas propicias para la regeneración natural. Según Serrada (2003), la compactación del suelo es un factor que dificulta la regeneración natural, pues impide el contacto de la semilla con la tierra mineral y el enraizamiento adecuado. La presencia de desechos orgánicos, hojarasca y ramillas también evitan el contacto de la semilla con la tierra, así como la presencia de la cobertura herbácea densa que, además, causa competencia entre especies. Las condiciones propicias para la regeneración natural se pueden generar mediante acciones de mejora de suelo que reduzcan su compactación, tales como la escarificación y quemadas controladas.

Por otro lado, se sugiere reforestar con especies nativas aquellas áreas con densidad forestal baja, para incrementarla hasta 1 600 plantas por hectárea. El crecimiento de los bosques conlleva aumento en las tasas de interceptación y mayor infiltración de humedad en los suelos; además, una estructura balanceada de

method applied is able to capture the behavior of land uses in recent years for the study region.

Acknowledgments

The authors thank for the financial support of CONACYT for the student scholarship granted through the Program of Master of Science in Forest Sciences and thank the Centro de Investigación en Recursos Naturales y Medio Ambiente (CIRENAM) of the Universidad Autónoma Chapingo. In the same way, we thank the anonymous reviewers whose suggestions improved the manuscript.

End of English version

References / Referencias

- Aguirre, C. O. (1997). Hacia el manejo de ecosistemas forestales. *Madera y Bosques*, 3(2), 3–11. doi: 10.21829/myb.1997.321369
- Bedoya, J. C., & Barrera, M. (2006). Convergencia de las cadenas de Markov. *Scientia Et Technica*, 12, 73–78. doi: 10.22517/issn.2344-7214
- Bouchard-Côté, A., Vollmer, S. J., & Doucet, A. (2017). The bouncy particle sampler: A non-reversible rejection-free Markov chain Monte Carlo method. *Journal of the American Statistical Association*. doi: 10.1080/01621459.2017.1294075
- Castañeda, R. M. F., Endara, A. A. R., Villers, R. M. de L., & Nava, B. E. G. (2015). Evaluación forestal y de combustibles en bosques de *Pinus hartwegii* en el Estado de México según densidades de cobertura y vulnerabilidad a incendios. *Madera y Bosques*, 21(2), 45–58. doi: 10.21829/myb.2015.212444
- Consejo Civil Mexicano para la Silvicultura Sostenible (CCMSS). (2008). Estudio de las condiciones territoriales y su percepción del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl, Zoquiapan y Anexas. Retrieved from http://www.ccmss.org.mx/descargas/Estudio_de_las_condiciones_territoriales_y_su_percepcion_del_Parque_Nacional_Iztaccihuatl-Popocatepetl_Zoquiapan_y_anexas.pdf
- Eastman, R. (2012). IDRISI Selva. GIS and image processing software version 17.0. Massachusetts, USA: Clark Labs.
- Garrocho, C., Jiménez-López, E., & Álvarez-Lobato, J. (2016). Modelando la migración interestatal de México: cadenas de Markov estáticas versus cadenas de Markov dinámicas con medias móviles. *Papeles de Población*, 22(90), 109–144. doi: 10.22185/24487147.2016.90.036
- Hoyos, L., Lara, P., Ortiz, E., López, R., & González, J. (2009). Evaluation of air pollution control policies in Mexico City using finite markov chain observation model. *Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones*, 16(2), 255–266. Retrieved from www.redalyc.org/articulo.oa?id=45326951006

los rodales proporciona hábitat para la fauna silvestre, contribuyendo al incremento de la biodiversidad.

De acuerdo con Aguirre (1997) es importante mantener árboles moribundos, muertos y caídos de grandes dimensiones para preservar las especies asociadas a los mismos, que pueden estar distribuidos en una fracción del rodal formando bosquetes sobremaduros. También indica la prevención de incendios forestales mediante la reducción en la acumulación de materiales combustibles y el uso de brechas cortafuego, líneas negras, podas, chaponeos, aclareos o quemas prescritas. Finalmente, es importante que la Estación Forestal Zoquiapan continúe con sus objetivos fundamentales de enseñanza, investigación, conservación y, sobre todo, de manejo sustentable de los recursos naturales.

Conclusiones

De acuerdo con los resultados, para el año 2020, las zonas cubiertas por bosques dentro de la microcuenca Zoquiapan presentan baja probabilidad de cambio en su uso de suelo. Lo anterior siempre y cuando continúen los esfuerzos que hasta ahora se realizan para conservar el sitio. Las áreas cubiertas de pastizal y con actividad agrícola también presentan baja probabilidad de cambio. Puntualmente, y considerando los resultados de la matriz de transición en el estado estable, las probabilidades de permanencia de los usos de suelo son de 94 % para uso forestal, 88 % para el pastizal y 91 % para la actividad agrícola. El método aplicado es capaz de capturar el comportamiento de los usos de suelo en los últimos años para la región de estudio.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero de CONACYT por la beca estudiantil otorgada a través del Programa de Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales y del Centro de Investigación en Recursos Naturales y Medio Ambiente (CIRENAM) de la Universidad Autónoma Chapingo. De la misma forma se agradece a los revisores anónimos cuyas sugerencias mejoraron el manuscrito.

Fin de la versión en español

- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (2005). Uso de Suelo y Vegetación a escala 1:250000, Serie III (conjunto nacional). Retrieved July 1, 2016 from <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2009). Vegetación y uso de suelo a escala 1:250000, serie IV (conjunto nacional). Retrieved July 1, 2016 from <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2013). Continuo de elevaciones mexicano 3.0. Retrieved July 1, 2016 from <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/descarga.aspx>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2014). Conjunto de datos vectoriales edafológicos, escala 1:250,000, Serie II. Retrieved from <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/layouts/eda250s2gw>
- Levin, D. A., Peres, Y., & Wilmer, E. L. (2009). *Markov chains and mixing times*. USA: American Mathematical Society. Retrieved from <http://www.statslab.cam.ac.uk/~beresty/teach/Mixing/markovmixing.pdf>
- Lomas-Barrié, C. T., Terrazas-Domínguez, S., & Tchikoué-Maga, H. (2005). Proposal of territorial ecological ordering for the National Park Zoquiapan and annex. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 11(1), 57–71. Retrieved from https://chapingo.mx/revistas/forestales/contenido.php?section=article&id_articulo=431&doi=
- López, E., Bocco, G., & Mendoza, M. (2001). Predicción del cambio de cobertura y uso del suelo: el caso de la ciudad de Morelia. *Investigaciones Geográficas*, 45, 39–55. doi: 10.14350/riig.59145
- Martínez-Santiago, S., Alvarado-Segura, A., Zamudio-Sánchez, F., & Cristobal-Acevedo, D. (2017). Spatio-temporal analysis of forest modeling in Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 23(1), 5–22. doi: 10.5154/r.rchscfa.2016.01.003
- Memarian, H., Balasundram, S. K., Talib, J. B., Sung, C. T. B., Sood, A. M., & Abbaspour, K. (2012). Validation of CA-Markov for simulation of land use and cover change in the Langat Basin, Malaysia. *Journal of Geographic Information System*, 4(6), 542–554. doi: 10.4236/jgis.2012.46059
- Orantes, G. F., & Musálem, S. M. (1982). Determinación de calidad de estación *Pinus hartwegii* Lind. Zoquiapan México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 35(7), 3–20. Retrieved from <http://cienciasforestales.inifap.gob.mx/editorial/index.php/Forestales/article/view/1012>
- Paegelow, M., Teresa, M., & Menor, J. (2003). Cadenas de Markov, evaluación multicriterio y evaluación multiobjetivo para la modelización prospectiva del paisaje. *GeoFocus*, 3, 22–44. Retrieved from <http://geofocus.org/index.php/geofocus/article/view/21>
- Partida, V. (1989). Aplicación de cadenas de Markov para proyecciones demográficas en áreas geopolíticas menores. *Estudios Demográficos y Urbanos*, 4(3), 549–571. Retrieved from <http://estudiosdemograficosyurbanos.colmex.mx/index.php/edu/article/view/739>
- Pérez, R., Valdez, R., Moreno, F., González, A., & Valdez, J. (2012). Predicción espacial de cambios del uso de suelos en Texcoco, Estado de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2(5), 59–72. Retrieved from <http://cienciasforestales.inifap.gob.mx/editorial/index.php/Forestales/article/view/179/170>
- R Development Core Team. (2016). *R: A language and environment for statistical computing*. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing.
- Reynoso, R., Valdez, J., Escalona, M., de los Santos, H., & Pérez, M. (2016). Cadenas de Markov y autómatas celulares para la modelación de cambio de uso de suelo. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 37(1), 72–81. Retrieved from <http://riha.cujae.edu.cu/index.php/riha/article/view/319/272>
- Rodríguez Trejo, D. (2001). La ecología del fuego en el ecosistema de *Pinus hartwegii*. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 7(2), 145–151. Retrieved from https://chapingo.mx/revistas/forestales/contenido.php?id_articulo=357&doi=1111&id_revista=3
- Rojas, J., Barajas, A., Riemann, H., & Franti, C. (1993). Markov chain modeling of endemic cattle diseases in the tropics of Mexico. *Ciencia Rural*, 23, 325–328. doi: 10.1590/S0103-84781993000300014
- Saldi, N., Linder, T., & Yüksel, S. (2013). Quantized stationary control policies in Markov decision processes. Retrieved from <https://arxiv.org/abs/1310.5770>
- Sanchayeeta, A., & Southworth, J. (2012). Simulating forest cover changes of bannerghatta national park based on a CA-Markov model: A remote sensing approach. *Remote Sensing*, 4(10), 3215–3243. doi: 10.3390/rs4103215
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2009). *Impacto del cambio climático en las tierras y sus características*. México, DF: Autor.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2010). NOM-059-SEMARNAT. Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestre-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo. México: Diario Oficial de la Federación. Retrieved from http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5173091&fecha=30/12/2010
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2013). *Acuerdo por el que se da a conocer el resumen del Programa de Manejo del Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl*. México: Diario Oficial de la Federación. Retrieved from <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/DOFsr/DO3032.pdf>
- Serrada, R. (2003). Regeneración natural: situaciones, concepto, factores y evaluación. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 15, 11–16. Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2976231>
- Tejada-Nichols, R. (2010). *Estudio técnico por contingencia ambiental del Parque Nacional Izta-Popo, Zoquiapan y Anexas*. Amecameca, Estado de México, México:

- Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan, CONANP-SEMARNAT.
- Torres, P. V. H., Gaytán, M., & Tinoco, Z. M. A. (2017). Dinámica de la inversión extranjera directa en los estados de México: un análisis de cadenas de Markov espaciales. *Contaduría y Administración*, 62(1), 141–162. doi: 10.1016/j.cya.2016.07.001
- Universidad Autónoma Chapingo. (2005). Programa de manejo para el aprovechamiento de arbolado muerto en la Estación Forestal Experimental Zoquiapan. Texcoco, México. Retrieved from <http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/mex/estudios/2005/15EM2005FD017.pdf>
- Villegas, P. R., Muñoz, R. C., Muñoz, J., Gallo, G. C. A., & Ponce, R. J. (2011). Tasa de cambio de uso del suelo en el Parque Nacional Pico de Orizaba, Veracruz, México en el periodo 2003–2011. Retrieved from <http://docplayer.es/28997255-Tasa-de-cambio-de-uso-del-suelo-en-el-parque-nacional-pico-de-orizaba-veracruz-mexico-en-el-periodo.html>
- Virgen-Cobos, G. (2016). *Establecimiento de una red de monitoreo meteorológico en la Estación Forestal Experimental Zoquiapan*. Chapingo, Texcoco, México: Universidad Autónoma Chapingo
- Zepeda, G. C., Nemiga, X. A., Helgueras, A. L., & Madrigal, U. D. (2012). Análisis del cambio del uso del suelo en las ciénegas de Lerma (1973-2008) y su impacto en la vegetación acuática. *Investigaciones Geográficas*, 78, 48–61. doi: 10.14350/rig.32469