

PREDICCIÓN DEL CAMBIO DE USO/COBERTURA ARBOLADA EN MÉXICO A TRAVÉS DE PROBABILIDADES DE TRANSICIÓN

PREDICTION OF LAND USE CHANGE/FOREST COVER IN MEXICO THROUGH TRANSITION PROBABILITIES

J. Manuel **Torres-Rojo**¹, Octavio S. **Magaña-Torres**¹, Francisco **Moreno-Sánchez**²

¹Centro de Investigación y Docencia Económicas, División de Economía. Carretera México-Toluca No. 3655. Colonia Lomas de Santa Fe, México D.F. 01210. (juanmanuel.torres@cide.edu). ²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. (magana.octavio@inifap.gob.mx), (moreno.francisco@inifap.gob.mx).

RESUMEN

Este artículo presenta un modelo de predicción del cambio de uso/cobertura del suelo a través de la proyección de matrices de probabilidades de transición. El modelo de predicción usa la información de cubierta forestal/uso del suelo generada por el INEGI en 1993 y 2000 y utiliza la información de 2007 para validar el modelo. Las coberturas en escala nacional (1:250,000) se cortaron por estado y se generó una matriz de probabilidades de transición de tipos de vegetación/uso del suelo por cada estado. Después, a través de sistemas de ecuaciones de modelos tipo logit, se relacionaron las probabilidades de transición con variables climáticas, físicas y socioeconómicas para explicar la dinámica de cambios de los bosques y las selvas del país. La metodología generada permite analizar los cambios de cada tipo de vegetación aislada en los usos diferentes, con lo que se mejora la predicción y el entendimiento de la dinámica de cambio de la cobertura del suelo. Esto permite identificar claramente los causales de deforestación y brinda información para desarrollar y focalizar mejores instrumentos de política pública vinculados con la reducción de la deforestación. Los resultados mostraron que las transiciones básicas de regiones arboladas a cultivos y pastizales siguen dinámicas diferentes en bosques que en selvas. Resulta notable que al identificar diferencias en las transiciones se pueden diferenciar condiciones en las que el cambio de uso puede ser persistente y en las que no lo es.

Palabras clave: Cambio de uso/cobertura del suelo, deforestación, matrices de transición, modelos tipo logit.

ABSTRACT

This article presents a prediction model for land use change/forest cover through the projection of transition probability matrices. The prediction model uses the information of forest cover/land use generated by INEGI in 1993 and 2000, and uses the information from 2007 to validate the model. The covers at national scale (1:250,000) are broken off by state and a transition probability matrix was generated of the types of vegetation/land use for each state. Then, through a system of equations of logit models, the transition probabilities were related to climate, physical and socioeconomic variables, in order to explain the change dynamics of forests and rainforests in the country. This methodology allows analyzing the changes in each type of vegetation isolated from the different uses, with which the prediction and understanding of the change dynamics of land cover are improved. This allows clearly identifying the causes of deforestation and provides information to develop and focus better policy instruments linked to the reduction of deforestation. The results showed that the basic transitions of forest regions to crops and grasslands follow different dynamics in forest and in rainforests. It is noteworthy that when identifying differences in the transitions, conditions can be distinguished where land use change can be persistent and where it is not.

Keywords: Land use change/cover, deforestation, transition matrices, logit models.

INTRODUCTION

The loss of plant coverage brings with it the degradation of the genetic reserve, the loss of potential for use of the multiple environmental goods and services provided by

* Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: enero, 2015. Aprobado: junio, 2015.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 50: 769-785. 2016.

INTRODUCCIÓN

La pérdida de cubierta vegetal trae asociada la degradación de la reserva genética, la pérdida del potencial de uso de los bienes y servicios ambientales múltiples que proporcionan los ecosistemas para el bienestar humano y biológico, el calentamiento global, la alteración de ciclos hidrológicos y biogeoquímicos, la introducción de especies exóticas, el exterminio de las especies nativas y la pérdida de hábitat (Cairns *et al.*, 2000; Velázquez *et al.*, 2002).

El proceso de deforestación mundial alcanzó niveles alarmantes hacia la década de 1980 (Chomitz y Gray, 1996), pero entre 2000 y 2010 este proceso mostró signos de reducción significativa. No obstante varios países, principalmente en África, América Latina y el Sureste de Asia, mantienen tasa, altas de deforestación sobre todo en sus bosques tropicales (FAO, 2012; Hosonuma *et al.*, 2012). A pesar de la reducción de la deforestación, las cifras son altas todavía y FAO (2012) señala que en la década de 1990 desaparecieron alrededor de 16 millones ha de bosques en el mundo, comparado con los 13 millones ha perdidas en la década previa.

En México hay esfuerzos por realizar la cartografía del uso del suelo (INEGI, 2000, 2007; 2012; SARH, 1992; 1994; Dirzo y Masera, 1996) y para evaluar la dinámica espacio-temporal de la cubierta vegetal (Velázquez *et al.*, 2002; López, 2012; Rosete *et al.*, 2014), análisis conocido como de cambio de uso/coertura del suelo (Berry *et al.*, 1996). Muchos de estos análisis se realizaron con objetivos, criterios (evaluación y clasificación de coberturas) y escalas diversas (desde 1:50 000 hasta 1:8 000 000), por lo cual los análisis de cambio de cobertura/uso del suelo no son homogéneos, y los resultados no son comparables en la mayoría de los casos (Velázquez *et al.*, 2002).

El análisis de la dinámica de cambio de uso de suelo en México se ha realizado en formas diversas: 1) análisis espaciales comparativos que identifican con varias escalas los patrones de cambio (Mendoza y Dirzo, 1999; Velázquez *et al.*, 2002; 2003); 2) los que identifican una relación causal entre variables institucionales (Bray *et al.*, 2004; 2008) socioeconómicas y físicas con el uso de modelos dinámicos o estáticos estatales (Torres y Flores, 2001), municipal (Deininger y Minten, 2002), locales o regionales (Dirzo y García 1992; Mendoza y Dirzo, 1999; Ochoa y Gon-

ecosystems for human and biological wellbeing, as well as global warming, alteration of water and biogeochemical cycles, introduction of exotic species, extinction of native species, and loss of habitat (Cairns *et al.*, 2000; Velázquez *et al.*, 2002).

The global deforestation process reached alarming levels by the 1980s (Chomitz and Gray, 1996), although between 2000 and 2010 this process showed signs of significant reduction. Nevertheless, several countries, mostly in Africa, Latin America and Southeast Asia, maintain high levels of deforestation, particularly in their tropical forests (FAO, 2012; Hosonuma *et al.*, 2012). Despite the reduction of deforestation, the figures are still high, and FAO (2012) points out that in the 1990s around 16 million ha of forests in the world disappeared, compared to the 13 million ha lost in the prior decade.

In México, there are efforts both to carry out the cartography of land use (INEGI, 2000, 2007; 2012; SARH, 1992; 1994; Dirzo and Masera, 1996), and to evaluate the space-time dynamics of plant coverage (Velázquez *et al.*, 2002; López, 2012; Rosete *et al.*, 2014), an analysis known as land use change/land cover (Berry *et al.*, 1996). Many of these analyses were carried out with diverse objectives, criteria (cover evaluation and classification) and scales (from 1:50 000 to 1:8 000 000), so that the analyses of land cover /land use change are not homogeneous, and the results are not comparable in most cases (Velázquez *et al.*, 2002).

The analysis of the dynamics of land use change in México has been performed in various manners: 1) comparative spatial analyses that identify the change patterns with several scales (Mendoza and Dirzo, 1999; Velázquez *et al.*, 2002; 2003); 2) analyses that identify a causal relation between institutional variables (Bray *et al.*, 2004; 2008), socioeconomic and physical ones, with the use of dynamic or static models at State (Torres and Flores, 2001), municipal (Deininger and Minten, 2002), local or regional (Dirzo and García 1992; Mendoza and Dirzo, 1999; Ochoa and González, 2000; Trejo and Dirzo, 2000; Chowdhury, 2006; Castillo-Santiago *et al.*, 2007) community (Alix-García *et al.*, 2005; Alix-García, 2007; López, 2012), or even at pixel level (Muñoz *et al.*, 2003). They all have methodological advantages and disadvantages given the territorial level used and the information available.

zález, 2000; Trejo y Dirzo, 2000; Chowdhury, 2006; Castillo-Santiago *et al.*, 2007), en una comunidad (Alix-García *et al.*, 2005; Alix-García, 2007; López, 2012) o de un pixel (Muñoz *et al.*, 2003). Todos tienen ventajas y desventajas metodológicas dado el nivel territorial usado y la información disponible.

Este estudio muestra una metodología para predecir los cambios de uso/cobertura del suelo con uso forestal y dos objetivos: el predictivo *per se*, y el de identificar y ordenar causales posibles de esta dinámica. El estudio difiere de otros realizados con la misma escala estatal, porque desagrega el proceso de cambio de uso/cobertura en las diferentes coberturas resultantes, de tal forma que la variable de respuesta no es el cambio de uso total, sino una aproximación de la superficie convertida de bosque/selva a otro uso/cobertura. Con esta desagregación se plantea la hipótesis de que los procesos de cambio de uso/cobertura del suelo varían de acuerdo al tipo de vegetación (bosque o selva) y el uso/cobertura resultante.

MATERIALES Y MÉTODOS

Modelo

Una matriz de transición de uso/cobertura del suelo (MT) se integró al evaluar las diferentes coberturas en dos periodos de tiempo sucesivos (Cuadro 1) y compara las cartas de uso/cobertura del suelo de 2000 y 2007 para México con sus respectivas tasas anuales de cambio. Una vez integrada la MT se calcula la matriz de probabilidades de transición (MPT), esto es, la matriz que muestra en cada una de sus entradas la probabilidad (p_{ij}) de que una formación pase de un estado i a uno j en el siguiente periodo de evaluación. Por ejemplo, según la información en el Cuadro 1, la probabilidad de que la cobertura bosque en el año 2000 pase a ser pastizal inducido en el siguiente periodo (2007) es $37/34\ 163=0.00109$. Las probabilidades de cambio (p_{ij}) deben cumplir con la restricción de que su suma a partir de una formación i debe ser equivalente a la unidad, esto es:

$$\sum_{j=1}^m p_{ij} = 1, \quad \forall i = 1, 2, \dots, m.$$

Assumiendo homogeneidad en los eventos que causan la transición, la MPT sigue un proceso Markoviano de primer orden (Balzter, 2000) por lo que la probabilidad del cambio de uso/cobertura del suelo depende sólo de la condición actual, de aquí que la historia de los eventos no tiene relación alguna con las futuras probabilidades de transición; con ello, implícitamente se

This study presents a methodology to predict the changes of land use/cover with forestry use, and two objectives: the predictive one, *per se*, and that of identifying and ordering possible causes of this dynamic. The study differs from others performed with the same State scale because it disaggregates the process of land use change/cover in the different resulting covers, so that the response variable is not the total change in use, but rather an approximation to the surface converted from forest/rainforest to a different use/cover. With this disaggregation, the hypothesis is set out that processes of land use change/cover vary according to the type of vegetation (forest or rainforest) and the resulting use/cover.

MATERIALS AND METHODS

Model

A transition matrix (TM) of land use/cover was integrated when evaluating the different covers in two successive periods of time (Table 1), and compares the land use/cover maps for 2000 and 2007 in México with their respective annual change rates. Once the TM was integrated, the transition probability matrix (TPM) is calculated; that is, the matrix that shows in each one of its entries the probability (p_{ij}) for a formation to change from status i to j in the following evaluation period. For example, according to the information in Table 1, the probability for the forest cover in the year 2000 to change into induced grassland in the next period (2007) is $37/34,163=0.00109$. The change probabilities (p_{ij}) must satisfy the restriction that their sum from formation i must be equivalent to the unit, that is:

$$\sum_{j=1}^m p_{ij} = 1, \quad \forall i = 1, 2, \dots, m.$$

Assuming homogeneity in the events that cause the transition, the TPM follows a first order Markovian process (Balzter, 2000), so that the change probability of the land use/cover depends only on the current condition; from this, the history of the events does not have any relation with the future transition probabilities; therefore, it is implicitly assumed that the set of causes of the transition is the same throughout time. Under this assumption, it is possible to predict a future state by just knowing the current state, and the TPM through the following equation:

$$b_{t+1} = Pb_t$$

Cuadro 1. Matriz de transición de coberturas vegetales (ha x 1,000) entre los años 2000 y 2007.
 Table 1. Plant cover transition matrix (ha x 1,000) between years 2000 and 2007.

Año	Uso/Cobertura	2007										Tasa anual [†] de cambio (%)
		Bosques	Matorral	Otros tipos de vegetación	Pastizales inducidos	Pastizales naturales	Selva	Otras coberturas	Vegetación hidrófila	Total		
0	Bosques	33 102	10	3	309	37	228	472	1	34 163	0.148	
0	Matorral	373	55 735	27	57	39	113	861	67	57 273	-0.228	
2	Otros tipos de vegetación	9	117	2013	6	2	8	102	18	2276	-0.955	
0	Pastizales inducidos	282	37	3	5109	12	287	614	3	6347	-0.666	
0	Pastizales naturales	95	130	31	19	9938	28	372	2	10 616	-0.545	
0	Selva	225	24	5	288	18	29 043	1726	32	31 362	-0.270	
0	Otras coberturas	425	294	30	266	159	1037	44 693	107	47 011	-5.874	
0	Vegetación hidrófila	7	16	16	3	13	28	231	4871	5 184	-0.228	
0	Total	34 519	56 364	2128	6057	10 218	30 773	49 072	5101	194 231		

[†] Tasa (δ) calculada como $[(S_2/S_1)^{(1/m)}]^{-1}$; donde n representa el número de años entre la cobertura en el periodo 1 (S_1) y el periodo 2 (S_2). Elaboración del Cuadro con base en las Series II y III de INEGI ♦ *Rate (δ) calculated as $[(S_2/S_1)^{(1/m)}]^{-1}$; where n represents the number of years between the cover in period 1 (S_1) and period 2 (S_2). The Table was elaborated based on Series II and III from INEGI.

asume que el conjunto de causales de la transición es el mismo a lo largo del tiempo. Bajo este supuesto es posible predecir un estado futuro con sólo conocer el estado actual y la MPT a través de la siguiente ecuación:

$$b_{t+1} = Pb_t$$

donde b_t es el vector columna que representa la fracción de tierra en cada una de las m categorías en el periodo y P es la MPT de tamaño $m \times m$. Por ejemplo, la distribución de uso/cobertura para el periodo $t+3$ estaría dada por: $b_{t+3} = Pb_{t+2} = P^2b_{t+1} = P^3b_t$, de hecho es posible identificar un estado estacionario, esto es, la probabilidad de transición después de n periodos (π), cuando

$$n \rightarrow \infty \left(i.e., \pi_j = \lim_{n \rightarrow \infty} p_j^{(n)} \right).$$

Las probabilidades de transición (p_{ij}) pueden asumirse constantes (Balzter, 2000) o variables de acuerdo con un conjunto de causales (Chomitz y Gray, 1996; Sandoval y Real, 2005) con lo que se incorpora cierta adaptabilidad al proceso. La contribución de estos causales se modela con la ecuación modificada de cadena de Markov a la forma: $b^{t+1} = P[f(t)] b_t$; donde $f(t)$ es una función que define las p_{ij} en el tiempo t con base en un conjunto de variables a través de un modelo general. El procedimiento en este estudio para integrar el efecto de variables socioeconómicas, físicas y climáticas en la definición del cambio de uso del suelo fue el siguiente. Esta metodología se usó con éxito para evaluar el efecto de la temperatura y densidad en poblaciones de ácaros (Woolhouse y Harmsen, 1987) y en modelos de cobertura vegetal que incluyen variables socioeconómicas o condiciones climáticas, e incluso indicadores de la composición de los tipos de cobertura (Henderson y Wilkins, 1975; Marsden, 1983; Ludeke *et al.*, 1990; Chomitz y Gray, 1996; Balzter, 2000; Benabdellah *et al.*, 2003; Sandoval y Real, 2005).

Con el objetivo de enriquecer la información para el ajuste del modelo cada estado se consideró una unidad independiente. Para ello, las coberturas en escala nacional (1:250,000) se cortaron por estado y se generó una MPT de tipos de uso/cobertura del suelo por cada entidad. Las probabilidades de transición (p_{ij}) se modelaron por un conjunto de variables a través de un modelo logístico de la forma:

$$p_{ij} = \frac{e^{(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \dots + \beta_n x_n)}}{1 + e^{(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \dots + \beta_n x_n)}}$$

donde las β representan parámetros del modelo y las x corresponden a cada una de las variables explicativas de la variación en la probabilidad de transición. Por construcción, las p_{ij} tienen

where b_t is the column vector that represents the fraction of land in each one of the m categories in the period and P is the TPM of size $m \times m$. For example, the distribution of use/cover for period $t+3$ would be given by: $b_{t+3} = Pb_{t+2} = P^2b_{t+1} = P^3b_t$; in fact it is possible to identify a stationary status, that is, the transition probability after n periods (π), when $n \rightarrow \infty$

$$\left(i.e., \pi_j = \lim_{n \rightarrow \infty} p_j^{(n)} \right).$$

The transition probabilities (p_{ij}) can be assumed to be constant (Balzter, 2000), or variable, according to a set of drivers (Chomitz and Gray, 1996; Sandoval and Real, 2005), with which certain adaptability is incorporated into the process. The contribution of these causes is modelled by the Markov chain modified equation to the form: $b^{t+1} = P[f(t)] b_t$; where $f(t)$ is a function that defines p_{ij} in time t based on a set of variables through a general model. This last procedure is the one used in this study to integrate the effect of socioeconomic, physical and climate variables in the definition of land use. This methodology was used successfully to evaluate the effect of temperature and density on mite populations (Woolhouse and Harmsen, 1987), and in plant cover models, which include socioeconomic variables or climate conditions, and even indicators of the composition of the types of covers (Henderson and Wilkins, 1975; Marsden, 1983; Ludeke *et al.*, 1990; Chomitz and Gray, 1996; Balzter, 2000; Benabdellah *et al.*, 2003; Sandoval and Real, 2005).

With the objective of enhancing the information to adjust the model, each State in the federation was considered as an independent unit. For this purpose, the covers at the national scale (1:250 000) were broken off by State and a TPM of the types of land use/cover was generated for each State. The transition probabilities (p_{ij}) were modelled by a set of variables through a logistic model of the form:

$$p_{ij} = \frac{e^{(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \dots + \beta_n x_n)}}{1 + e^{(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \dots + \beta_n x_n)}}$$

where β represent parameters of the model and the x correspond to each one of the explicative variables of the variation in the transition probability. From construction, the p_{ij} have the restriction of $\sum_j p_{ij} = 1 \quad \forall i = 1, 2, 3, \dots, m$; therefore, the set of transition probabilities of the i -nth category should be

la restricción de que $\sum_j p_{ij} = 1 \quad \forall i = 1, 2, 3, \dots, m$; por lo que el conjunto de probabilidades de transición de la i -ésima categoría se debe modelar en forma simultánea y con la restricción de que la suma de probabilidades sea igual a la unidad. Este sistema tiene la siguiente forma al ser linealizado:

$$\ln (P_{i1} / (1 - p_{i1})) = \beta_{10} + \beta_{11}x_1 + \beta_{12}x_2 + \dots + \beta_{1n}x_n + \alpha_{11}y_1 + \alpha_{12}y_2 + \alpha_{13}y_3 + \dots + \alpha_{1k}y_k$$

$$\ln (P_{i2} / (1 - p_{i2})) = \beta_{20} + \beta_{21}x_1 + \beta_{22}x_2 + \dots + \beta_{2n}x_n + \alpha_{21}y_1 + \alpha_{22}y_2 + \alpha_{23}y_3 + \dots + \alpha_{2k}y_k$$

$$\ln (P_{ij} / (1 - p_{ij})) = \beta_{j0} + \beta_{j1}x_1 + \beta_{j2}x_2 + \dots + \beta_{jn}x_n + \alpha_{j1}y_1 + \alpha_{j2}y_2 + \alpha_{j3}y_3 + \dots + \alpha_{jk}y_k$$

$$\ln (P_{mm} / (1 - p_{mm})) = \beta_{m0} + \beta_{m1}x_1 + \beta_{m2}x_2 + \dots + \beta_{mn}x_n + \alpha_{m1}y_1 + \alpha_{m2}y_2 + \alpha_{m3}y_3 + \dots + \alpha_{mk}y_k$$

$$1 = \delta + \frac{\sum_{j=1}^m e^{(\beta_{j0} + \beta_{j1}x_1 + \beta_{j2}x_2 + \beta_{j3}x_3 + \dots + \beta_{jn}x_n + \alpha_{j1}y_1 + \alpha_{j2}y_2 + \alpha_{j3}y_3 + \dots + \alpha_{jk}y_k)}}{1 - e^{(\beta_{j0} + \beta_{j1}x_1 + \beta_{j2}x_2 + \beta_{j3}x_3 + \dots + \beta_{jn}x_n + \alpha_{j1}y_1 + \alpha_{j2}y_2 + \alpha_{j3}y_3 + \dots + \alpha_{jk}y_k)}}$$

donde $\ln(p_{ij}/(1-p_{ij}))$ es el logit ($\text{lg}t_{ij}$) de la p_{ij} , β y x tienen la misma notación anterior, mientras que las α representan parámetros del modelo asociados a las variables endógenas (y) dentro del sistema. Estas variables representan variables relacionadas bi-direccionalmente dentro de cada ecuación del modelo, como por ejemplo la misma probabilidad de transición de otras formaciones o en un caso extendido, las mismas condiciones socioeconómicas o de accesibilidad. Las p_{ij} pueden depender de otras probabilidades de transición dentro del mismo sistema, con lo que los errores de cada ecuación en el modelo pueden estar correlacionados. Por ello, el ajuste se realizó con el procedimiento model (PROC MODEL) de SAS® utilizando la variante de ajuste con estimadores de máxima verosimilitud de información completa.

Con base en los modelos ajustados y la información del año 2000 se calcularon las probabilidades de transición predichas (p_{ij}) para cada uso/cobertura y en cada entidad, a partir de las cuales se recuperó la MT estatal para el periodo siguiente (2007). Luego, con la suma de las MT estatal se integró una MT nacional con su respectiva MPT. Esta última se comparó estadísticamente con la MPT calculada a partir de la Serie IV (INEGI, 2012), a través de una prueba χ^2 . Debe aclararse que los periodos de proyección y medición podrían ser parcialmente equivalentes, dado que la Serie II se publicó en el año 2000, pero se elaboró de 1994 a 1999, mientras que la Serie III se elaboró de 2003 a 2005 y se publicó en el 2007. Por lo tanto, el intervalo de proyección

modelled simultaneously and with the restriction that the sum of probabilities be equal to the unit. This system has the following form when being analyzed:

there $\ln(p_{ij}/(1-p_{ij}))$ is the logit ($\text{lg}t_{ij}$) from p_{ij} , β and x have the same notation as before, whereas the α represent parameters of the model associated to the endogenous variables (y) within the system. These variables represent variables related bi-directionally within each equation of the model, as for example the same transition probability of other formations or, in an extensive case, the same socioeconomic or accessibility conditions. The p_{ij} can depend on other transition probabilities within the same system, with which the errors from each equation in the model can be correlated. Therefore, the adjustment was performed with the procedure model (PROC MODEL) from SAS®, using the adjustment variant with maximum likelihood estimators of complete information.

Based on the adjusted models and the information for year 2000, the predicted transition probabilities (p_{ij}) were calculated for each use/cover and in each State, from which the state TM was recovered for the following period (2007). Then, with the sum of the State TMs, a national TM with its respective TPM was integrated. The latter was compared statistically with the TPM calculated from Series IV (INEGI, 2012), through a χ^2 test. It must be clarified that the projection and measurement periods could be partially equivalent, given that Series II was published in the year 2000, but it was elaborated from 1994 to 1999, whereas Series III was elaborated from 2003 to 2005, and published in 2007. Therefore, the interval of projection assumed between Series II and Series III is 7 years, and from 1995 to

asumido entre la Serie II y la Serie III es de 7 años, y de 1995 a 2002 los mismos que se asumen para el intervalo de medición entre las Series III y IV (INEGI, 2012).

Datos

La información cartográfica usada para estimar las matrices de transición fueron las Serie II (INEGI, 2000) y Serie III (INEGI, 2007) de INEGI. El corte de las coberturas estatales se realizó con base en la cobertura estatal publicada por INEGI (INEGI, 2000a). Dado que la nomenclatura de coberturas integra un número elevado de categorías, éstas se reagruparon en categorías (Cuadro 2).

El conjunto de variables explicativas de los cambios en probabilidades de transición se seleccionó según la disponibilidad, alineación con la fecha de proyección (información al año 2000; Cuadro 3) y con las recomendaciones de Balzter (2000), Benabdellah *et al.* (2003) y Sandoval y Real (2005).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Transición bosque a otras formaciones

Las predicciones de la transición de bosque a bosque (b-b), bosque a matorral (b-m), y bosque a otras coberturas entre las cuales se consideran cultivo y zona urbana (b-oc), mostraron ajustes satisfactorios a juzgar por los estadísticos de bondad de ajuste del sistema de ecuaciones, no así la transición de bosque a pastizales inducidos (b-pi). La transición de bosque a pastizal natural (b-pn) tuvo baja frecuencia, por lo cual se consideró como un falso cambio (Cuadro 4).

2002, the same that are assumed for the measurement interval between Series III and IV (INEGI, 2012).

Data

The cartographic information used to estimate the transition matrices was Series II (INEGI, 2000) and Series III (INEGI, 2007). The breakoff of State covers was carried out based on the State cover published by INEGI (INEGI, 2000a). Given that the nomenclature of covers integrates a high number of categories, they are regrouped into categories (Table 2).

The set of explicative variables of changes in transition probabilities was selected according to availability, aligning with the projection date (information up to year 2000; Table 3), and recommendations by Balzter (2000), Benabdellah *et al.* (2003), and Sandoval and Real (2005).

RESULTS AND DISCUSSION

Transition from forest to other formations

The predictions of transition from forest to forest (f-f), forest to shrub (f-s), and forest to other covers, among which are considered crops and urban zones (f-oc), showed satisfactory adjustments judging from the statistics for goodness of fit of the system of equations, although the transition from forest to induced grasslands (f-ig) did not. The transition from forest to natural grassland (f-ng) had low frequency, so it was considered as a false change (Table 4).

The prediction of the most important transition, f-f, which measures the permanence of this cover,

Cuadro 2. Descripción de categorías usadas para estandarizar nomenclaturas de las coberturas de las diferentes formaciones, basada en la nomenclatura INEGI (Victoria *et al.*, 2011).

Table 2. Description of categories used to standardize nomenclature of covers from different formations, based on the nomenclature by INEGI (Victoria *et al.*, 2011).

Categoría de tipo de vegetación	Abreviatura	Descripción de la categoría
Bosque	b	Todos los bosques de clima templado, incluyendo matorral de coníferas
Matorral	m	Todos los tipo de matorral, chaparral y mezquital incluyendo vegetación de desiertos arenosos
Otras coberturas	oc	Zonas urbanas, cuerpos de agua y cultivos
Otros tipos de vegetación	otv	Pastizal gipsófilo y halófilo, vegetación de dunas y palmar
Pastizal natural	pn	Cualquier pastizal natural incluyendo sabanas, pastizal-huizachal y pradera de alta montaña
Pastizal inducido y cultivado	pi	Pastizales inducidos y cultivados
Selva	s	Todos los tipos de selva
Vegetación hidrófila	vh	Manglar, tular, popal y vegetación de galería

Cuadro 3. Fuentes de información de las variables usadas en los modelos de predicción.
Table 3. Sources of information of variables used in the prediction models.

Variable	Fuente de información
Desviación estandar. Número de incendios forestales por año	CONAFOR (2005)
Consumo de leña combustible (m ³ per cápita)	Díaz y Maserá (2003)
Temperatura máxima (°C)	CONABIO (2001)
Precipitación anual (mm)	CONABIO (2001)
Educación (Proporción de población > 18 años alfabeta)	INEGI (2000b)
PIB per cápita año 2000 (Miles \$/año)	INEGI (2000c; 2000d)
PIB municipal (Miles \$/año)	INEGI (2000c)
Densidad caminos (km/km ²)	IMT (1999)
Migración neta (Miles personas)	CONAPO (2000)
Proporción de la superficie en cultivo agrícola	SAGARPA (2004)
Proporción de la población rural	INEGI (2000b)
Proporción de la superficie en ejidos y comunidades	INEGI (2000a; 2004)
Densidad de la población rural	INEGI (2000b)

La predicción de la transición más importante, b-b, que mide la permanencia en esta cobertura, mostró que un aumento en la precipitación reduce la probabilidad de transición, esto es, fomenta el cambio del bosque a otros usos. El efecto de la temperatura es: a mayor temperatura máxima hay una permanencia menor del área forestal; no obstante el comportamiento se revierte cuando las temperaturas máximas son mayores a 26 °C. El comportamiento de estas dos variables está estrechamente ligado con el cambio de uso más frecuente de esta cobertura, que está dirigida a cultivos agrícolas y zonas urbanas donde se demandan terrenos con precipitación buena y temperaturas máximas poco extremas. Por ello, en las localidades arboladas con temperatura mayor y humedad menor habrá una conservación mayor del suelo forestal que está ligado a su aptitud agrícola menor.

El coeficiente de Gini de la distribución del PIB entre municipios se tomó como proxy de la presencia de polos de riqueza en el estado. La variable tiene relación directa con la probabilidad de permanencia del bosque, lo que puede interpretarse como el efecto de los polos de riqueza para atraer población, que al final se traduce en menor presión humana al bosque. La accesibilidad, medida a través de la densidad de caminos (km km⁻²), también se relaciona con la posibilidad de tener infraestructura para realizar otras actividades productivas que le quitan presión al bosque. La variable podría considerarse endógena (*i.e.* la permanencia de bosque puede atraer su aprovechamiento e incentivar la construcción de caminos),

showed that an increase in precipitation reduces the probability of transition, that is, promotes the change from forest to other uses. The effect of temperature is: with higher maximum temperature, a lower permanence of the forest area is verified; however, the behavior is reversed when the maximum temperatures are above 26 °C. The behavior of these two variables is closely linked to the most frequent change in use of this coverage, which is directed towards agricultural crops and urban zones where lands with good precipitation and maximum temperatures that are not extreme are demanded. Therefore, in the forest localities with higher temperature and lower humidity, there will be greater conservation of the forest land, which is linked to its lower agricultural aptitude.

The Gini coefficient of the GDP distribution among municipalities was taken as proxy of the presence of poles of wealth in the State. The variable is related directly to the forest's probability of permanence, which can be interpreted as the effect of the poles of wealth to attract population, which finally translates into lower human pressure on the forest. The accessibility, measured through the road density (km km⁻²), is also related to the possibility of having infrastructure to perform other productive activities that take pressure away from the forest. The variable could be considered endogenous (*i.e.* the forest's permanence can attract its exploitation and foster the construction of roads), but the form of the response variable avoids this problem.

Cuadro 4. Estimaciones del modelo de ecuaciones simultáneas de las transiciones de bosque a otras formaciones. La variable de respuesta es el logit de la probabilidad de transición referida.

Table 4. Estimations of the model of simultaneous equations of transitions from forest to other formations. The response variable is the logit of the referred transition probability.

Variable	Bosque-bosque		Bosque-otras coberturas		Bosque-pastizal inducido		Bosque-matorral	
	Estimador	Significancia	Estimador	Significancia	Estimador	Significancia	Estimador	Significancia
Intercepto	23.628	0.0348	-177.249	<.0001	-8.075	<.0001	77.526	0.0040
Climática:								
Temperatura máxima (°C)	-1.336	0.0806	9.032	<.0001			-3.740	0.0064
Temperatura máxima ² (°C ⁻²)	0.025	0.0563	-0.153	<.0001			0.062	0.0069
Precipitación anual (mm)	-0.002	<0.0001						
Precipitación anual ² (mm ²)			1.46 X10 ⁻⁶	0.0004				
Desviación Estandar Incendios forestales			3.445	<.0001	1.385	0.0156	-1.608	0.0003
Económica:								
Consumo de leña combustible (m ³ per cápita)			-0.004	0.0034				
Educación (Prop Pob > 18 años alfabeta)			0.180	0.0360			-0.289	0.0006
PIB per cápita (pesos año ⁻¹)			1.222	0.0002				
PIB per cápita ² (pesos año ⁻¹) ²			-0.025	0.0002				
Inequidad PIB	5.922	0.0058						
Densidad caminos (km km ⁻²)			-888.446	<.0001			256.433	0.0038
Densidad caminos ² (km km ⁻²) ²	17456	0.0010						
Migración neta (Miles de personas)	-0.288	0.0006	10.509	0.0012			-0.115	0.0857
Proporción de la superficie en cultivo agrícola	-0.067	0.0018	0.337	<.0001			-0.055	0.0183
Sociodemográfica:								
Proporción de población indígena			0.146	0.0082			-0.144	0.0020
Proporción de la población rural			0.098	0.0038	0.041	0.0089	-0.037	0.0128
Proporción de la superficie en ejidos y comunidades	-0.046	0.0006	0.039	0.0071				
Densidad de la población rural	-0.013	0.0260	0.060	<.0001			-0.028	0.0022
R-Cuadrada	0.872		0.970		0.429		0.747	
R-Cuadrada ajustada	0.795		0.919		0.377		0.567	
Pr > F	0.0001		0.0001		0.0021		0.0081	
Log likelihood	25.753		$\delta = 0.00382$					

pero la forma de la variable de respuesta evita este problema.

La migración neta también fue altamente significativa para describir el proceso de conservación del bosque. La presencia de una cantidad mayor de individuos no nacidos en la unidad geográfica fomenta el cambio de uso forestal por otros usos. La variable puede estar relacionada con dos efectos: el de presión poblacional mayor y aquel relacionado con costumbres de uso del suelo; no obstante, el primero se ha capturado con la variable “densidad de la población rural”.

La proporción de superficie agrícola fue significativa y con relación inversa. Esta variable se relaciona con la disponibilidad tecnológica y mercados asociados a la actividad agrícola que fomentan la extensión de la frontera agrícola. Además, la proporción de la superficie en ejidos y comunidades fue significativa y con relación inversa. Esta proporción no representa ejidos/comunidades con bosque, por lo que no está relacionada con la conservación mayor o menor que se pueda realizar en núcleos agrarios forestales. En suma, todas las variables usadas para explicar la permanencia del bosque resultaron significativas y con el signo esperado.

La transición bosque a otras coberturas (b-oc), básicamente cultivo y desarrollo urbano es la más importante por su frecuencia. Si bien tiene relación con variables climáticas, su causal más importante son las variables económicas. Las variables climáticas muestran que temperaturas máximas superiores a 29.5 °C no son aptas para los cultivos, por lo cual es menos atractivo el cambio desde el uso forestal. La humedad también influye en la disponibilidad del terreno para uso agrícola, por lo que a mayor precipitación, mayor es la probabilidad de transición. El cambio de uso forestal también se relaciona con la desviación estándar de los siniestros forestales; a mayor variación en el número de estos eventos mayor probabilidad de cambio de uso forestal, lo cual sugiere que aperturas grandes, resultantes de siniestros, se podrían aprovechar para abrir terrenos de cultivo.

Dentro de las variables económicas están el PIB per cápita y la accesibilidad. El primero muestra que a mayor riqueza mayor cambio de uso del suelo forestal hasta un umbral (aproximadamente \$ 24 000 por año), a partir del cual la probabilidad de cambio de uso se reduce, que es un efecto similar a la tendencia de degradación ambiental de Kuznets (Stern *et al.*,

Net migration was also highly significant to describe the process of forest conservation; the presence of a higher number of individuals who were not born in the geographic unit promotes the change from forest use to other uses. The variable can be related to two effects: that of a higher population pressure and the one related to customs in land use, although the first has been captured with the variable “density of rural population”.

The proportion of agricultural surface was significant and with an inverse relation. This variable is related to technological availability and markets associated to the agricultural activity that promote the expansion of the agricultural frontier. Also, the proportion of surface in *ejidos* and communities was significant and with an inverse relationship. This proportion does not represent *ejidos*/communities with forest, so it is not related to the higher or lower conservation that can be carried out in forest communities. In sum, all the variables used to explain the permanence of the forest were significant and with the expected sign.

The transition forest to other covers (f-oc), basically crops and urban development, is the most important because of its frequency. Albeit it is related to climate variables, its most important cause is economic variables. The climate variables show that maximum temperatures above 29.5 °C are not apt for crops, which is why the change from forest use is less attractive. The humidity also influences the availability of the terrain for agricultural use, which is why when there is higher precipitation, the probability for transition is higher. The change from forest use is also related to the standard deviation of forest disasters; with higher variation in the number of these events, there is higher probability of change from forest use, which suggests that large clearings, resulting from disasters, could be taken advantage of to open cultivation lands.

Within the economic variables, there is the per capita GDP and accessibility. The first shows that when there is greater wealth there is higher change of forest land use up to a threshold (approximately \$24 000 per year), from which the probability of use change is reduced, which is a similar effect to the trend of Kuznets environmental degradation (Stern *et al.*, 1996). The coefficient associated to the road density shows that higher accessibility is not necessarily related to a loss of temperate forests, as is

1996). El coeficiente asociado a la densidad de caminos muestra que la accesibilidad mayor no está necesariamente relacionada con una pérdida de bosques templados, como se piensa que sucede en bosques tropicales (Chomitz, 2007), y en este caso el modelo sugiere que la accesibilidad mayor reduce presión al bosque, presumiblemente a través del desarrollo de otras actividades económicas y su efecto en la migración y el desarrollo de polos de atracción económica.

De manera análoga al efecto en conservación b-b, la migración neta y la superficie en cultivo agrícola aumentan la probabilidad de transición b-oc. Las variables densidad de población rural, proporción de la población rural y proporción de la superficie en ejidos y comunidades tienen un comportamiento inverso al discutido para la conservación del bosque (b-b). En este grupo de variables sociodemográficas resalta que la proporción de la población indígena aumenta la transición del bosque a cultivo o desarrollo urbano. La variable no está ligada a la población indígena que habita el bosque, por lo que su interpretación debería realizarse con reserva.

La transición b-pi es la segunda más importante por su magnitud aunque se encuentra muy localizada en los estados de Chiapas, Jalisco, Oaxaca y Estado de México. La transición está estrechamente relacionada con eventos extremos (incendios) que aparentemente crean grandes claros, mismos que son inducidos a formar pastizales, razón por la cual parece probable que algunos de estos eventos sean de origen antropogénico con esa intención. Otra variable relacionada directamente con esta transición es la proporción de la población rural, variable que muestra que esta transición es altamente dependiente de la presión humana sobre el bosque.

La transición b-m es poco común y su presencia es mayor en los estados de Baja California, Coahuila, Guerrero y Querétaro. Entre las variables económicas importantes que definen esta transición destacan la educación (con relación inversa), la densidad de caminos (relación directa), migración neta (relación inversa) y la proporción de la superficie en uso agrícola. La densidad mayor de caminos promueve la transición seguramente por efecto del cambio de uso del suelo mal logrado. El modelo también muestra que en medida que hay menos superficie arable, la transición b-m es más probable. Estas relaciones fortalecen

thought that it happens in tropical forests (Chomitz, 2007), and in this case, the model suggests that a higher accessibility reduces the pressure on the forest, presumably through the development of other economic activities and their effect on migration and the development of economic attraction poles.

In a manner analogous to the effect on f-f conservation, the net migration and the surface of agricultural crops increase the probability of transition f-oc. The variables density of rural population, proportion of rural population, and proportion of surface in *ejidos* and communities have an inverse behavior to the one discussed for the conservation of the forest (f-f). In this group of sociodemographic variables, it stands out that the proportion of indigenous population increases the transition from forest to crops or urban development. The variable is not linked to the indigenous population that inhabits the forest, so its interpretation should be done with reserve.

The transition f-ig is the second most important one because of its magnitude, although it is quite limited to the States of Chiapas, Jalisco, Oaxaca and Estado de México. The transition is closely related to extreme events (fires) that apparently create large clearings, which are induced into forming grasslands, reason why it seems likely that some of these events are of anthropogenic origin, with this intention. Another variable directly related to this transition is the proportion of rural population, variable that shows that this transition is highly dependent of human pressure on the forest.

The transition f-s is not very common and its presence is higher in the States of Baja California, Coahuila, Guerrero and Querétaro. Among the important economic variables that define this transition, the ones that stand out are education (with inverse relation), road density (direct relation), net migration (inverse relation), and the proportion of surface with agricultural use. The higher road density promotes the transition surely as a result of the effect of the ill-handled change of land use. The model also shows that insofar as there is less arable surface, the transition f-s is more likely. These relationships strengthen the hypothesis that the transition f-s is linked to the abandonment of marginal cultivation lands that were originally forest (Chomitz, 2007).

la hipótesis de que la transición b-m está ligada al abandono de tierras de cultivo marginal que originalmente fueron bosque (Chomitz, 2007).

Transición selva a otras formaciones

Los resultados del ajuste del sistema de ecuaciones relacionadas con la transición de selva a otras formaciones mostró que la predicción de la transición de selva a cultivo (s-oc), selva a pastizal inducido (s-pi) y la permanencia de la selva (s-s) se ajustó satisfactoriamente, y los ajustes fueron superiores al de la falsa transición selva a bosque (s-b) (Cuadro 5).

La variación en el número de incendios forestales, la presencia de polos económicos, la presencia de población indígena y el consumo de leña combustible fueron las variables con más peso en la conservación de la selva (s-s). La temperatura tiene menos significancia pero es consistente con el resultado obtenido para la transición selva-cultivo/zona urbana y alineado a la presencia de variaciones en la cantidad de incendios.

El consumo de leña combustible es una variable inversamente relacionada con la probabilidad de permanencia de la selva. Esta relación evidencia no sólo la degradación de la selva como resultado de la extracción de leña combustible, sino también el cambio de uso con formas tradicionales de cultivo (roza-tumba-quema) aplicadas en forma masiva. La variable proporción de población rural fue significativa y con efecto positivo, el cual está ligado a la discusión anterior. En las variables económicas se confirmó que la inequidad en PIB, promovida por centros económicos importantes, atrae mano de obra y resta presión al cambio de uso de la selva.

La transición selva-cultivo/zona urbana (s-oc) depende de la temperatura, variación en siniestros y de la precipitación. Los resultados muestran que la transición aumenta en localidades con precipitación mayor hasta el límite máximo de 1050 mm, valor a partir del cual la probabilidad de transición se reduce. Este intervalo está claramente relacionado con el intervalo en el que la productividad agrícola es superior; fuera de ese intervalo la deseabilidad de cambio de uso se reduce. El ajuste muestra que a mayor riqueza mayor probabilidad de transición en una relación cuadrática que asemeja a la curva de degradación ambiental de Kuznets (Stern *et al.*, 1996). La densidad de caminos es otra variable relevante que

Transition from rainforest to other formations

The results of the adjustment of the system of equations related to the transition from rainforest to other formations showed that the prediction of transition from rainforest to crop (rf-oc), rainforest to induced grassland (rf-ig), and the permanence of rainforest (rf-rf) adjusted satisfactorily, and the adjustments were superior to those of the false transition rainforest to forest (rf-f) (Table 5).

The variation in the number of forest fires, the presence of economic poles, the presence of indigenous population and the consumption of firewood were the variables with greatest weight in the conservation of the rainforest (rf-rf). The temperature has less significance but is consistent with the result obtained for the transition rainforest-crop/urban zone and aligned with the presence of variations in the number of fires.

Consumption of firewood is a variable that is inversely related to the probability of the rainforest permanence. This relation evidences not only the degradation of the rainforest as a result of the extraction of firewood, but also the change of use with traditional cultivation systems (slash and burn) applied massively. The variable proportion of rural population was significant and had a positive effect, which is linked to the prior discussion. Among the economic variables, it was confirmed that inequity in the GDP, promoted by important economic centers, attracts workforce and decreases pressure on the change of rainforest use.

The transition rainforest-crop/urban zone (rf-oc) depends on the temperature, the variation in disasters, and the precipitation. Results show that the transition increases in localities with higher precipitation up to the maximum limit of 1 050 mm, value from which the probability of transition is reduced. This interval is clearly related with the interval where agricultural productivity is higher; outside this interval, the desirability for land use change is reduced. The adjustment shows that when there is higher wealth, the probability of transition in a quadratic relation that resembles the Kuznets' (Stern *et al.*, 1996) curve of environmental degradation is higher. Road density is another relevant variable that shows a direct relationship with the change in rainforest land use, in contrast with the behavior observed in temperate forests and in accordance with

Cuadro 5. Estimaciones del modelo de ecuaciones simultáneas de las transiciones de selva a otras formaciones. La variable de respuesta es el logit de la probabilidad de transición referida.
Table 5. Estimations of the model of simultaneous equations of the transitions from rainforest to other formations. The response variable is the logit of the transition probability referred.

Variable	Selva-bosque		Selva-cultivo-zona urbana		Selva-pastizal inducido		Selva-Selva	
	Estimador	Significancia	Estimador	Significancia	Estimador	Significancia	Estimador	Significancia
Intercepto	35.318	0.0022	-81.095	0.0163	27.942	<.0001	3.279	<.0001
Climáticas:								
Temperatura máxima (°C)			3.704	0.0211				
Temperatura máxima ² (°C ⁻²)			-0.055	0.0482	-0.007	0.0370	-0.092	<.0001
Precipitación anual (mm)			0.007	0.0370	-0.0008	<.0001		
Precipitación anual ² (mm ²)			-3.55 X10 ⁻⁶	0.0174				
Desviación Estandar Incendios forestales			-0.506	0.1800			0.624	0.0179
Económicas:								
Consumo de leña combustible (m ³ per cápita)			0.001	0.0475				
Educación (Prop Pob > 18 años alfabeta)	-0.399	0.0155	0.117	0.0411	0.251	0.0332	-0.002	0.0441
PIB per cápita (pesos año ⁻¹)	1.582	.0614	0.468	0.4520				
PIB per cápita ² (pesosaño ⁻¹) ²	-0.075	<.0001	-0.015	0.1941				
Inequidad PIB	-14.921	0.0009	-2.633	0.0004	-22.575	0.0419	5.532	0.0100
Densidad caminos (km km ⁻²)	-1729.21	0.004	313.434	0.0177	2041.570	0.0331		
Densidad caminos ² (km km ⁻²) ²	81301	0.0015			-93188	0.1901		
Migración neta (Miles de personas)	0.458	0.0098	0.076	0.0016				
Proporción de la superficie en cultivo agrícola					-0.271	0.0713		
Proporción de la superficie en ganadería			-0.031	0.1870	0.064	0.2007		
Sociodemográficas:								
Proporción de población indígena	-0.135	0.0063					0.042	0.0419
Proporción de la población rural			0.141	0.0152				
Proporción de la superficie en ejidos y comunidades			-0.071	0.0441				
R-Cuadrada		0.7596		0.9790		0.9484		0.8495
R-Cuadrada ajustada		0.5848		0.9546		0.9109		0.7958
Pr > F		0.0138		0.0001		0.0001		0.0001
Log likelihood		22.681		$\phi = 0.00192$				

muestra una relación directa con el cambio de uso del suelo de la selva, en contraste con el comportamiento observado en bosques templados y en concordancia con el observado en otras regiones del mundo para bosque tropical (Chomitz, 2007).

Otras variables económicas importantes para definir la transición selva-cultivo/zona urbana (s-oc) son el consumo de leña (arriba discutido); el nivel de educación, con una relación directa; y la inequidad en la distribución del PIB per cápita, con una relación inversa, que se discutió en párrafos anteriores. De nuevo resalta la variable migración neta con una relación positiva, que indica que a mayor presencia de individuos no originarios de la zona hay mayor impacto en cambio de uso del suelo. Otra variable relevante es la proporción de la superficie de uso ganadero, la cual tiene una relación inversa con la transición de la selva a cultivo y muestra así cierta sustitución en el uso del suelo. Lo contrario ocurre con la transición a pastizal inducido, donde existe complementariedad.

La proporción mayor de la población rural tiene efecto directo, lo que sugiere el efecto fuerte de la densidad poblacional sobre la conservación de la selva. En este sentido, se observa que si la mayor densidad está concentrada en ejidos o comunidades entonces el efecto del cambio de uso se reduce, presumiblemente debido a que este tipo de tenencia muestra menor posibilidad de inversión en el sector ganadero.

La transición s-pi se reduce tanto con el aumento de temperatura como de precipitación. Estas variables impactan directamente en la reducción de productividad del ganado. Otras variables económicas relacionadas con esta transición son la educación (relación positiva), la inequidad en la distribución del PIB per cápita (relación negativa), la densidad de caminos (relación positiva); todas discutidas en párrafos anteriores. En esta relación destaca que el comportamiento de la variable densidad de caminos es cuadrático, posiblemente debido a que el desarrollo ganadero es una etapa secundaria de uso del suelo cuando las entidades gozan de infraestructura mayor y desarrollo económico mejor. La proporción de uso agrícola es una variable relacionada inversamente, lo que confirma una relación de sustitución entre el uso agrícola y el ganadero en las tierras de selva desmontadas.

the one observed in other regions of the world for tropical forest (Chomitz, 2007).

Other important economic variables to define the transition rainforest-crop/urban zone (rf-oc) are firewood consumption (discussed above); level of education, with a direct relation; and inequity in per capita GDP distribution, with an inverse relation, which was discussed in prior paragraphs. Again, the variable net migration stands out with a positive relation, indicating that when there is greater presence of individuals who are not native to the zone, there is a higher impact on land use change. Another relevant variable is the proportion of the surface used for livestock production, which has an inverse relation with the transition from rainforest to crop and thus shows some substitution in land use. The contrary case occurs with the transition to induced grassland, where there is complementarity.

The higher proportion of rural population has a direct effect, which suggests the strong effect of population density on rainforest conservation. In this sense, it is observed that if the higher density is concentrated in *ejidos* or communities, then the effect of use change is reduced, presumably because this type of trend shows lower possibility of investment in the livestock production sector.

The transition rf-ig is reduced both with the increase in temperature and in precipitation. These variables impact directly on the reduction of livestock productivity. Other economic variables that are related to this transition are education (positive relation), inequity in per capita GDP distribution (negative relation), road density (positive relation); all of them discussed in prior paragraphs. In this relation, it stands out that the behavior of the variable road density is quadratic, possibly because livestock production development is a secondary stage in land use when the states have greater infrastructure and better economic development. The proportion of agricultural use is an inversely related variable, which confirms a relationship of substitution between the agricultural and livestock use in the rainforest lands cleared.

The transition rainforest-forest, which is assumed to be a false relation, was considered within the system of equations because it has a high frequency and because the rainforests that are highly degraded in drier climates can originate transition formations. Nevertheless, the adjustment is the least satisfactory.

La transición selva-bosque, que se asume es una falsa relación, se consideró dentro del sistema de ecuaciones por tener una frecuencia alta y porque las selvas muy degradadas en climas más secos pueden originar formaciones de transición. No obstante, el ajuste es el menos satisfactorio.

Validación del modelo

El modelo incluye la proyección de todos los usos/ coberturas, pero en este artículo se presentan sólo las coberturas bosque y selva y su transición a las coberturas mostradas en el Cuadro 2. Para estas coberturas se realizó una prueba sobre las \hat{p}_{ij} estimadas y las p_{ij} obtenidas a partir de la Serie IV (INEGI, 2012). Para el caso de bosques el valor de $\chi^2=0.007$ ($\alpha \geq 0.999$) y para el caso de selvas de $\chi^2=0.008$ ($\alpha \geq 0.999$). En ambos casos no hay evidencia para rechazar la hipótesis de que las probabilidades de transición predichas no son diferentes de las observadas, por lo que es válido señalar que el modelo de predicción a través de matrices de probabilidades de transición da predicciones estadísticamente similares a los valores observados.

CONCLUSIONES

El procedimiento de proyección generado a través de probabilidades de transición, modeladas a partir de un conjunto de variables físicas y socioeconómicas, permite explicar algunas diferencias entre la dinámica de cambios de uso de suelo de los bosques y selvas del país. El procedimiento enriquece el análisis de causales del cambio de uso del suelo y mejora la predicción dado que incorpora simultáneamente los cambios de un uso/cobertura a diversos usos, mismos que parecen tener dinámicas diferentes.

Las diferencias entre los causales del cambio de uso del suelo por tipo de bosque permiten identificar si el cambio de uso de suelo es persistente o solamente es temporal dado el causal y el uso al final del periodo de proyección. Además, esta identificación de causales da información sobre la eficacia que podrían tener los instrumentos diferentes de política pública que pueden aplicarse para reducir la deforestación en bosques templados o tropicales.

El análisis comparativo entre la matriz de transición predicha y la observada mostró que el procedimiento es altamente fiable dado que la proyección fue estadísticamente similar a la observada después

Validation of the model

The model includes the projection of all uses/ covers, but in this article, only the forest and rainforest covers are presented, as well as their transition to covers shown in Table 2. For these covers, a χ^2 test was performed on the estimated \hat{p}_{ij} and the p_{ij} obtained from Series IV (INEGI, 2012). For the case of forests, the value of $\chi^2=0.0075$ ($\alpha \geq 0.999$) was obtained and for the case of rainforests, $\chi^2=0.0083$ ($\alpha \geq 0.999$). In both cases, there is no evidence to reject the hypothesis that the transition probabilities predicted are not different from those observed, so it is valid to point out that the prediction model through transition probability matrices results in predictions that are statistically similar to the values observed.

CONCLUSIONS

The projection procedure generated through transition probabilities, modelled from a set of physical and socioeconomic variables, allows explaining some differences between the dynamics of land use change from forests and rainforests in the country. The procedure enriches the analysis of causes for land use change, and improves the prediction because it incorporates simultaneously the changes from one use/cover to diverse uses, which seem to have different dynamics.

The differences between the causes for land use change per type of forest allow identifying whether the land use change is persistent or only temporal due to the cause and the use at the end of the projection period. Besides, this identification of causes gives information regarding the effectiveness that different public policy instruments could have, which may be applied to reduce deforestation in temperate or tropical forests.

The comparative analysis between the transition matrices predicted and observed showed that the procedure is highly reliable given that the projection was statistically similar to that observed after a period, which could be interpreted as the existence of certain invariability in the causes for land use/cover change.

—End of the English version—

-----*-----

de un periodo, lo que se puede interpretar como la existencia de cierta invariabilidad en los causales de cambio de uso/cobertura del suelo.

LITERATURA CITADA

- Alix-García, J. 2007. A spatial analysis of common property deforestation. *J. Environ. Econ. Manage.* 53: 141-157.
- Alix-García, J., A. de Janvry, and E. Sadoulet. 2005. A tale of two communities: Explaining deforestation in Mexico. *World Dev.* 33: 219-235.
- Balster, H. 2000. Markov chain models for vegetation dynamics. *Ecol. Model.* 126: 139-154.
- Benabdellah B., K. F. Albrecht, V. L. Pomaz, E. A. Denisenko, and D. O. Logofet. 2003. Markov chain models for forest successions in the Erzgebirge, Germany. *Ecol. Model.* 159: 145-160.
- Berry, M. W., R. O. Flamm, B. C. Hazen, and R. L. MacIntyre. 1996. The land-use change and analysis system (LUCAS) for evaluating landscape management decisions. *IEEE Comput. Sci. Eng.* 3: 24-35.
- Bray, D. B., E. Duran, V. H. Ramos, J. F. Mas, A. Velázquez, R. B. McNab, D. Barry, and J. Radachowsky. 2008. Tropical deforestation, community forests, and protected areas in the Maya Forest. *Ecol. Soc.* 13: 56.
- Bray, D. B., E. A. Ellis, N. Armijo-Canto and C.T. Beck. 2004. The institutional drivers of sustainable landscapes: a case study of the 'Mayan Zone' in Quintana Roo, Mexico. *Land Use Pol.* 21: 333-346.
- Cairns M. A., P. K. Haggerty, R. Alvarez, B. H. J. de Jong and I. Olmsted. 2000. Tropical Mexico's recent land-use change: a region's contribution to the global carbon cycle. *Ecol. App.* 10: 1426-1441.
- Castillo-Santiago, M. A., A. Hellier, R. Tipper and B. H. J. de Jong. 2007. Carbon emissions from land-use change: An analysis of causal factors in Chiapas, Mexico. *Mitig. Adap. t Strat. Glob. Change* 12: 1213-1235.
- Chomitz, K. M. 2007. At loggerheads? Agricultural expansion, poverty reduction and environment in tropical forests. *World Bank Policy Research Report*. Washington, D.C. 284 p.
- Chomitz, K. M and D. A. Gray 1996. Roads, Land Use, and Deforestation: A Spatial Model Applied to Belize. *World Bank Econ. Rev.* 10: 487-512.
- Chowdhury, R. R. 2006. Driving forces of tropical deforestation: The role of remote sensing and spatial models. *Singapore J. Trop. Geog.* 27: 82-101.
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). 2005. Estadística Anual de Incendios Forestales 1970-2004. Coordinación General de Conservación y Restauración Forestal. Gerencia Nacional de Incendios Forestales.
- CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad). 2001. Catálogo de metadatos geográficos. http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/rhpri4mgw.xml?_httpcache=yes&_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no. (Consulta: Noviembre 2014).
- CONAPO (Consejo Nacional de Población). 2000. Índices de marginación 2000. CONAPO, México. 52 p.
- Deininger, K., and B. Minten . 2002. Determinants of deforestation and the economics of protection: an application to Mexico. *Am. J. Agr. Econ.* 84: 943-960.
- Díaz, R., y O. Maser (2003). Uso de la leña en México: situación actual, retos y oportunidades. Balance Nacional de Energía. Secretaría de Energía, México DF. pp: 99-109.
- Dirzo, R., and M. C. García 1992. Rates of deforestation in Los Tuxtlas, a neotropical area in Southeast Mexico. *Cons. Biol.* 6:84-90.
- Dirzo, R., y O. Maser. 1996. Clasificación y dinámica de la vegetación en México. *In: Criterios y terminología para analizar la deforestación en México*. SEMARNAP. México.
- Food and Agriculture Organization (FAO) 2012. Global Forest Resources Assessment 2010 Main Report. FAO Forestry paper 163. 340 p.
- Henderson, W. and C. W. Wilkins. 1975. The interaction of bush fires and vegetation. *Search* 6:130-133.
- Hosonuma, N., M. Herold, V. de Sy, R.S. de Fries, M. Broc-khaus, L. Verchot, A. Angelsen, and E. Romijn. 2012. An assessment of deforestation and forest degradation drivers in developing countries. *Env. Res. Lett.* 7: 044009.
- IMT (Instituto Mexicano del Transporte). 1999. Sistema de Información Geoestadística para el transporte (SIGET), Querétaro, México [cd-rom].
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2000. Serie II de uso del suelo y vegetación a escala 1:250 000, México [cd-rom].
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2000a. Marco Geoestadístico 2000. Información vectorial.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2000b. Censo General de Población y Vivienda 2000. Resultados Preliminares.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2000c. Sistema de Cuentas Nacionales de México (SCN). Banco de Información Económica.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2000d. XII Censo General de Población y Vivienda 2000, INEGI, 2000
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2004. V Censo Ejidal 2001.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2007. Conjunto Nacional de Uso del Suelo y Vegetación a escala 1:250 000. Serie III. DGG-INEGI. México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2012. Conjunto Nacional de Uso del Suelo y Vegetación a escala 1:250 000. Serie IV. DGG-INEGI. México
- López F, A. 2012. Deforestación en México: Un análisis preliminar. CIDE, Documento de trabajo 527, 32 p.
- Ludeke, A. K., R. C. Maggio, and L. M. Reid. 1990. An analysis of anthropogenic deforestation using logistic regression and GIS. *J. Env. Manage.* 32:247-259.
- Marsden, M. A. 1983. Modeling the effect of wildfire frequency on forest structure and succession in the northern Rocky Mountains. *J. Env. Manage.* 16: 45-62.
- Mendoza, E., and R. Dirzo. 1999. Deforestation in Lacandonia (southeast Mexico): evidence for the declaration of the northern most tropical hot-spot. *Biod. Cons.* 8:1621-1641.

- Muñoz, P. C., G. Alarcón, and J. C. Fernández. 2003. Pixel Patterns of Deforestation in Mexico: 1993-2000. Instituto Nacional de Ecología, SEMARNAT, México. 48 p.
- Ochoa G., S. and M. González E. 2000. Land use and deforestation in the highlands of Chiapas, Mexico. *App. Geog.* 20: 17-42.
- Rosete, V. F. A., Pérez D., J. L., Villalobos D., M., Navarro S., E. N., E. Salinas Ch., E., y R. Remond N. 2014. El avance de la deforestación en México 1976-2007. *Madera y Bosques* 20: 21-35.
- Sandoval, V. y P. Real. 2005. Modelamiento y prognosis estadística y cartográfica del cambio en el uso de la tierra. *Bosques* 26: 55-63.
- SARH (Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos). 1992. Inventario Forestal Nacional de Gran Visión. Reporte principal. Subsecretaría Forestal y de Fauna Silvestre. México. 49 p.
- SARH (Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos). 1994. Inventario Forestal Nacional Periódico, México 94, Memoria Nacional. Subsecretaría Forestal y de Fauna Silvestre. México. 81 p.
- SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural y Pesca). 2004. Servicio de Información y Estadística Agroalimentaria y Pesquera, Anuario Estadístico de la Producción Agrícola (SIACON), Base de Datos, México [CD]
- Stern, D. I., M. S. Common, and E. Barbier. 1996. Economic growth and environmental degradation: the environmental Kuznets curve and sustainable development. *World Development*. 24: 1151-1160.
- Torres R, J. M., and R. Flores X. 2001. Deforestation and land use change in Mexico. *J. Sust. For.* 12: 171-191.
- Trejo, I., and R. Dirzo. 2000. Deforestation of seasonally dry tropical forest: a national and local analysis in Mexico. *Biol. Cons.* 94: 133-142.
- Velázquez, A., E. Durán, I. Ramírez, J. F. Mas, G. Bocco, G. Ramírez, and J. L. Palacio. 2003. Land use-cover change processes in highly biodiverse areas: the case of Oaxaca, Mexico. *Global Env. Change* 13: 175-184.
- Velázquez, A., J. F. Mas, J. R. Díaz-Gallegos, R. Mayorgas-Saucedo, P. C. Alcántara, R. Castro, T. Fernández, G. Bocco, E. Ezcurra, y J. L. Palacio. 2002. Patrones y tasas de cambio de uso del suelo. *INE. Gaceta Ecológica* 62: 21-37.
- Victoria H., A., V., M. Niño A., J.A. Rodríguez A. y J.A. Argumedo E. 2011. Generación de información de uso de suelo y vegetación proyectos y convenios escala 1: 50000. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 1. http://www.inegi.org.mx/eventos/2011/Conf_Ibero/doc/ET6_46_HERN%C3%81NDEZ.pdf
- Woolhouse, M. E. J., and R. Harmsen. 1987. A transition matrix model of seasonal changes in mite populations. *Ecol. Model.* 37: 167-189.