



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS**

FACULTAD DE CIENCIAS  
MANEJO INTEGRAL DE ECOSISTEMAS

**ANÁLISIS SOCIOAMBIENTAL DE LOS FACTORES DE CAMBIO DE USO DE SUELO Y  
VEGETACIÓN EN EL ISTMO OAXAQUEÑO, MÉXICO**

**TESIS**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
**MAESTRO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS**

PRESENTA:

**LEONARDO CALZADA PEÑA**

**TUTORA PRINCIPAL DE TESIS: DRA. MARÍA FERNANDA FIGUEROA DÍAZ ESCOBAR**  
FACULTAD DE CIENCIAS, UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.

**COMITÉ TUTOR: DR. JORGE ARTURO MEAVE DEL CASTILLO**  
FACULTAD DE CIENCIAS, UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.

**COMITÉ TUTOR: DRA. ROSA IRMA TREJO VÁZQUEZ**  
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA, UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.

**MÉXICO, CD. MX.**

**ENERO, 2018**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.





**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS**

FACULTAD DE CIENCIAS  
MANEJO INTEGRAL DE ECOSISTEMAS

**ANÁLISIS SOCIOAMBIENTAL DE LOS FACTORES DE CAMBIO DE USO DE SUELO Y  
VEGETACIÓN EN EL ISTMO OAXAQUEÑO, MÉXICO**

**TESIS**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
**MAESTRO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS**

PRESENTA:

**LEONARDO CALZADA PEÑA**

**TUTORA PRINCIPAL DE TESIS: DRA. MARÍA FERNANDA FIGUEROA DÍAZ ESCOBAR**  
FACULTAD DE CIENCIAS, UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.

**COMITÉ TUTOR: DR. JORGE ARTURO MEAVE DEL CASTILLO**  
FACULTAD DE CIENCIAS, UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.

**COMITÉ TUTOR: DRA. ROSA IRMA TREJO VÁZQUEZ**  
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA, UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.

MÉXICO, CD. MX.

ENERO 2018



OFICIO FCIE/DAIP/1136/2018

ASUNTO: Oficio de Jurado

M. en C. Ivonne Ramírez Wence  
Directora General de Administración Escolar, UNAM  
P r e s e n t e

Me permito informar a usted que en la reunión ordinaria del Comité Académico del Posgrado en Ciencias Biológicas, celebrada el día **1 de octubre de 2018** se aprobó el siguiente jurado para el examen de grado de **MAESTRO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS** en el campo de conocimiento de **Manejo Integral de Ecosistemas** del alumno **CALZADA PEÑA LEONARDO** con número de cuenta **308024131** con la tesis titulada "**Análisis socioambiental de los factores de cambio de uso de suelo y vegetación en el istmo oaxaqueño, México**", realizada bajo la dirección de la **DRA. MARÍA FERNANDA FIGUEROA DÍAZ ESCOBAR**:

Presidente: DRA. MELANIE KOLB  
Vocal: DR. JOSÉ GASCA ZAMORA  
Secretario: DRA. ROSA IRMA TREJO VÁZQUEZ  
Suplente: DR. JORGE ARTURO MEAVE DEL CASTILLO  
Suplente: DRA. ANDREA MARTÍNEZ BALLESTE

Sin otro particular, me es grato enviarle un cordial saludo.

**Atentamente**  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU"  
Ciudad Universitaria, Cd. Mx., a 22 de noviembre de 2018

**DR. ADOLFO GERARDO NAVARRO SIGÜENZA**  
Coordinador del Programa



AGNS/VMVA/ASR/grf\*

## Agradecimientos institucionales

Al posgrado en Ciencias Biológicas, Universidad Nacional Autónoma de México, por darme la oportunidad de formarme como Maestro en Ciencias.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada, misma que me permitió llevar a término mis estudios de maestría (CVU 779492).

Al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (UNAM-DGAPA-PAPIIT), proyecto IA205216 "Análisis socioambiental de la conservación y el deterioro del bosque tropical caducifolio en México".

A la Dra. María Fernanda Figueroa Díaz Escobar por dirigir de una manera meritoria este proyecto de investigación.

Al Dr. Jorge Arturo Meave del Castillo y la Dra. Rosa Irma Trejo Vázquez por sus comentarios, sugerencia y constante supervisión, las cuales permitieron enriquecer este trabajo de tesis.

Al Dr. José Paruelo por supervisar mi trabajo de investigación durante mi estancia en la Universidad de Buenos Aires, Argentina.

A los miembros del jurado por sus atinados comentarios y sus agudas revisiones.

A los miembros de las comunidades en las que se desarrolló esta investigación, por su valiosa opinión y su gran disposición, sin las cuales este trabajo no hubiera sido posible.

Al grupo de trabajo de Análisis Socioambiental, que gracias a su empeño por el trabajo en equipo permitió el desarrollo de este trabajo.

*A mi familia*

*A Bárbara*

*Por las cosas sencillas y maravillosas*

# Índice

Resumen.....	I
Abstract .....	III
Presentación.....	IV
Introducción.....	1
El cambio en el uso del suelo y la vegetación.....	1
Corrientes teóricas del cambio ambiental desde una perspectiva histórica.....	2
Teorías del cambio ambiental en el siglo XIX.....	4
La divergencia teórica de la primera mitad del siglo XX .....	5
La explosión teórica en la segunda mitad del siglo XX.....	7
Marco metodológico.....	11
Factores explicativos en el CUSV.....	11
Modelo basado en patrones.....	13
Análisis estructural y de perspectiva local del CUSV desde la ecología política .....	14
Objetivos.....	15
Método.....	16
Sitio de estudio .....	16
Análisis de cambio en el uso de suelo y la vegetación.....	17
Construcción de las bases de Datos .....	18
Modelos lineales generalizados de efectos mixtos.....	20
Modelo basado en patrones.....	23
Análisis cualitativo estructural.....	28
Resultados.....	30
Características del CUSV en los Municipios de Asunción Ixtaltepec y Ciudad Ixtepec.....	30
Identificación e importancia de factores que regulan el CUSV .....	34
Factores predictivos de cambio.....	34
Modelo de simulación espacial del CUSV.....	36
Cálculo de pesos de evidencia .....	36
Potenciales de transición y simulación de cambios .....	42
Análisis estructural y local del proceso de cambio en el uso del suelo.....	45
Contexto histórico de la porción oaxaqueña Istmo de Tehuantepec.....	45

Percepción de factores y procesos de cambio a escala local.....	55
Análisis de factores desde un enfoque interdisciplinario.....	59
Discusión.....	61
Contribuciones del modelo basado en patrones.....	61
Contribuciones del análisis estructural y de perspectiva local del CUSV.....	64
Reflexión final y recomendaciones .....	67
Conclusiones .....	69
Referencias.....	70
Anexos.....	79

## Resumen

Existen diversos marcos teóricos y metodológicos con los que se ha abordado el análisis de los factores que inciden en el proceso de cambio de uso de suelo y vegetación (CUSV). Cada marco aporta diferentes visiones y explicaciones del CUSV, por lo que una perspectiva interdisciplinaria puede generar explicaciones más completas. El presente estudio tiene por objetivo analizar la influencia de un conjunto de factores biofísicos, políticos, sociales y económicos en la dinámica del uso del suelo en la porción oaxaqueña del Istmo de Tehuantepec, utilizando dos enfoques metodológicos distintos. El primero consistió en un análisis cuantitativo basado en un modelo de autómatas celulares, el cual permitió generar mapas de potenciales de transición para el periodo 1985-2015, a partir del cálculo de pesos de evidencia de cada factor. El segundo enfoque consistió en un análisis de los procesos de CUSV desde el enfoque de la ecología política, considerando factores estructurales, la dinámica sociopolítica local y las perspectivas locales, obtenidas de entrevistas semiestructuradas aplicadas a diversos actores sociales y un análisis bibliográfico del contexto histórico. De acuerdo con el primer enfoque, los pesos de evidencia mostraron que las variables biofísicas como la pendiente y variables sociales, como la designación intracomunitaria del uso del territorio, son factores determinantes en el CUSV. A partir de estas relaciones se generaron modelos de simulación para los procesos de cambio, como la deforestación, la degradación de bosques, la expansión agrícola y la urbanización. Al comparar los modelos de simulación con imágenes de satélite clasificadas para el mismo periodo se obtuvo un índice de similitud del 0.66 (área bajo la Curva de la Característica Operativa del Receptor) con imágenes satelitales clasificadas para los mismos periodos. El análisis cualitativo mostró la importancia del acceso a mercados, de los procesos de organización social, de las políticas públicas y de la migración en la toma de decisiones que determina socioambientales como la conservación, la expansión agrícola o el abandono de parcelas. En conjunto, ambos enfoques permitieron generar una explicación integral, que considera la importancia relativa de factores espaciales y no espaciales, a varias escalas espacio-temporales, y los procesos de toma de decisiones asociados a

éstos, para un periodo de 30 años. La comprensión de estas dinámicas abre la posibilidad de producir información necesaria para planear políticas y planes de gestión que respondan de manera más adecuada al contexto específico en el que se buscan aplicar.

*Palabras Clave:* Cambio de uso de suelo y vegetación; Heterogeneidad del paisaje Ecología Política, Modelo de Autómatas Celulares; Percepción Remota, Análisis estructural.

# Abstract

Various theoretical and methodological frameworks have been used to analyze the main drivers of land use/land cover change (LULCC). Each framework provides different interpretations and explanations of LULCC; therefore, interdisciplinary research efforts may allow for a more complete explanation of this process. The aim of this study was to analyze the influence of biophysical, political and socio-economic factors on LULCC processes in the Oaxacan portion of the Tehuantepec Isthmus, southern Mexico, by integrating two different theoretical and methodological approaches. First, we applied a spatially explicit cellular automata model, grounded on the weight of evidence (WOE); through this method, we calculated transition potential maps for the 1985-2015 period. Secondly, we conducted an analysis of structural factors and multiple-scale socio-political dynamics, from the perspective of political ecology, based on local and regional perspectives gathered through semi-structured interviews with various social actors, and bibliographic research regarding the region's historical context. Our results suggest that biophysical variables, such as slope, and social variables, such as intra-community land use planning, are the main LULCC drivers. LULCC scenarios were constructed based on these variables' WOE, considering historical rates of forest degradation, deforestation, agricultural expansion and urbanization. The comparison of LULCC scenarios and supervised classification maps resulted in a similarity index of 0.66 (area under the Receiver Operating Characteristic curve). In turn, the qualitative analysis showed the importance of access to markets, the processes of social organization, public policies, and migration in land use decision making, that in turn affects socioenvironmental processes, as conservation or agricultural expansion. The explanations obtained from different methodological and theoretical positions enabled us to generate a more complete understanding of the role played by each factor on the spatial and temporal dynamics of LULCC, while considering the decision-making process behind it, for a 30-y period. This understanding provides an opportunity to produce better information to inform the design of policies and management plans that respond more adequately to the specific context of the implementation site.

*Key words:* Land Use/Land Cover Change; Landscape heterogeneity Political Ecology, Cellular Automata Model; Remote Sensing; Structural analysis.

## Presentación

El presente estudio se centra en el análisis de los factores que influyen en el proceso de cambio en el uso del suelo y la vegetación en dos municipios ubicados en la porción oaxaqueña del Istmo de Tehuantepec, en el sur de México. Estos municipios se caracterizan por poseer grandes zonas cubiertas por ecosistemas tropicales secos, entre los que destacan la selva baja caducifolia y las sabanas, que están entre los ecosistemas tropicales más amenazados a nivel mundial (Quesada *et al.* 2009; Stoner y Sánchez-Azofeifa 2009). Esto se debe, en parte, a que los ecosistemas tropicales secos se caracterizan ser menos entendidos tanto ecológica como socialmente, en comparación con los ecosistemas tropicales húmedos como las selvas altas perennifolias (Quesada *et al.* 2009). Además, en nuestro país, los ecosistemas tropicales secos están pobremente representados en las áreas naturales protegidas, a pesar de poseer aproximadamente 20% de la diversidad vegetal a nivel nacional (CONABIO, 2007).

Esta investigación busca contribuir al entendimiento de las condiciones y los procesos que influyen en la transformación y degradación de los sistemas tropicales secos. A pesar de que existe una extensa literatura que aborda el análisis del cambio de uso de suelo, incluso desde perspectivas interdisciplinarias, son pocos los estudios que analizan este proceso usando más de un enfoque teórico o metodológico. Así, el objetivo principal de este trabajo es analizar la influencia de un conjunto de factores biofísicos, políticos, sociales y económicos sobre la dinámica del uso del suelo del periodo de 1985-2015, integrando dos enfoques de análisis, uno cuantitativo y otro cualitativo. El primer enfoque consiste en la generación de un modelo estocástico-determinístico basado en autómatas celulares, mientras que el segundo analiza el proceso de cambio desde una perspectiva histórica y local, a partir de entrevistas e información documental.

En la sección de introducción se describe el concepto de cambio en el uso del suelo y la vegetación, y su relevancia como un problema socioambiental global. Se incluye una breve revisión de los diferentes marcos teóricos que se han usado para abordar el cambio ambiental y

este proceso, en particular. Esta revisión comprende un recorrido histórico desde documentos que abordaban la transformación ambiental y del territorio desde una perspectiva económica y desde la geografía física, publicadas en las últimas décadas del siglo XIX, pasando por el surgimiento de las numerosas teorías económicas, ecológicas y sociales desarrolladas en la primera mitad del siglo XX, hasta llegar al desarrollo de teorías multi- e interdisciplinarias como la ecología política. Finalmente, este capítulo culmina con la presentación del enfoque metodológico utilizado en este estudio, el cual busca abordar, de una manera integral, la complejidad que involucra el proceso de CUSV y sus factores, los cuales operan a diferentes escalas espacio-temporales.

La sección de métodos comprende tres apartados principales. El primero reseña las características más relevantes del sitio de estudio. En el segundo apartado se detallan los métodos aplicados para desarrollar el análisis cuantitativo, el cual incluye la recolección y el geoprocésamiento de distintas variables. Asimismo, se incluye el desarrollo de modelos lineales generalizados de efectos mixtos para la selección de variables y, finalmente, los distintos pasos que comprenden el desarrollo del modelo basado en patrones, con el uso de autómatas celulares y la elaboración de mapas de potenciales de transición basados en el método de pesos de evidencia. La última sección del Capítulo muestra los métodos empleados para el análisis estructural y de perspectiva local del cambio.

La sección de resultados inicia con una descripción de los patrones de cambio en el uso del suelo en los periodos 1985-1997, 1997-2004, 2004-2011 y 2011-2015; se incluyen las tasas de transición anual calculadas por tipo de cobertura y la descripción espacial y temporal de los cambios, considerando la influencia de procesos como la expansión agrícola y urbana. Los resultados del análisis estructural y de perspectiva local de cambio exponen una descripción del contexto histórico de la región istmo de Oaxaca y el análisis de los procesos económicos y políticos más relevantes a escala global, nacional y regional. Posteriormente, se presenta el análisis de los procesos socioambientales y de cambio en el espacio descritos por los entrevistados. Si bien este trabajo pone un marcado interés en los aspectos cuantitativos, la parte final de la sección

establece una narrativa que integra elementos, tanto del enfoque cuantitativo como del cualitativo para generar un análisis integral de proceso de CUSV en los municipios de estudio.

La sección de discusión plantea una comparación de los resultados obtenidos por éste y otros estudios enfocados al CUSV. Se destacan las coincidencias y diferencias sobre la importancia dada a cada factor, dependiendo su escala espacial y temporal. Además, se discute acerca de las ventajas de abordar un fenómeno complejo, como el CUSV, desde perspectivas diferentes, lo que permite generar explicaciones más sólidas. Además, se discuten las limitaciones del enfoque aquí propuesto. La sección de discusión expone algunas reflexiones finales y la exposición de perspectivas a futuro dentro del estudio del CUSV. La última sección presenta las conclusiones generales obtenidas en la realización de este trabajo de investigación.

# Introducción

## El cambio en el uso del suelo y la vegetación

El efecto que han tenido las actividades humanas sobre la composición, la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas es innegable (Rindfuss *et al.* 2004). Un ejemplo claro de este fenómeno son las evidencias de que estamos –como humanidad– rebasando un conjunto de límites planetarios. Éstos son umbrales ambientales en nueve aspectos clave dentro los cuales la humanidad debe operar para que sea posible su desarrollo en condiciones seguras (Rockström *et al.* 2009b). Numerosos autores muestran que estos nueve aspectos regulan la estabilidad y la capacidad de recuperación de todos los ecosistemas terrestres, sin embargo, en la actualidad se ha rebasado el umbral de alerta en cuatro de ellos. Éstos son el cambio climático, la pérdida de biodiversidad, la alteración de ciclos biogeoquímicos y el cambio de uso de suelo y vegetación (CUSV; Scheffer *et al.* 2001; Adegoke *et al.* 2007; Rockström *et al.* 2009a, a; Biermann 2012; Whiteman *et al.* 2013; Steffen *et al.* 2015). El uso de suelo se refiere al conjunto de arreglos espaciales que producen las distintas actividades para las que se gestiona la tierra con fines sociales y económicos (*e.g.*, zonas de pastoreo, agrícolas, de extracción de madera o conservación; Farmer y Cook 2013). El CUSV incluye la conversión de ecosistemas nativos a zonas bajo influencia humana (*i.e.* usos de suelo), así como también el recambio entre distintas actividades o entre distintos tipos de vegetación (Rindfuss *et al.* 2004). El CUSV es particularmente importante en países en vías de desarrollo y más en aquellos caracterizados por la presencia de ecosistemas tropicales, razones por las que se ha motivado un debate intelectual continuo en torno al análisis de este fenómeno (Lambin *et al.* 2003).

Para poder contrastar las diferentes teorías que se han aplicado al análisis del cambio ambiental –incluido el CUSV–, es importante entender cómo éstas se enmarcan en distintas corrientes epistemológicas (*i.e.* diferentes discursos sobre cómo se adquiere, transmite, altera e integra el conocimiento, para generar un cúmulo de teorías). Existen diversos marcos teóricos que abordan los procesos de interacción entre el humano y su entorno, tanto explícita como

implícitamente. Estos marcos parten de diferentes posturas y explicaciones debido a que cada uno posee una conceptualización distinta de la relación entre la naturaleza y el ser humano (Jarosz 2006; Turner y Robbins 2008; Robbins 2012). En este contexto, aunque se puede considerar que todos los marcos tienen como objetivo entender cómo y por qué cambia el ambiente, cada uno posee una expresión conceptual y metodológica distinta; es decir, cada marco considera diferentes supuestos, relaciones, patrones, procesos y factores de cambio.

Aunque hoy día existe un acuerdo generalizado sobre la complejidad inherente en el CUSV, así como sobre la necesidad de abordarlo a través de una visión interdisciplinaria, pocos estudios abordan esta complejidad al incluir factores ecológicos, sociopolíticos e institucionales, y todavía menos integran distintos marcos teóricos para generar acciones, como la formulación de políticas públicas o la toma de decisiones sobre el territorio (Foley *et al.* 2005; Li *et al.* 2005; Liu *et al.* 2007; Duit y Galaz 2008; Moberg y Simonsen 2011). En este sentido, la revisión crítica de la evolución teórica de los estudios enfocados al análisis del cambio ambiental se torna relevante, pues puede arrojar luz sobre las ventajas y desventajas que aporta cada marco teórico y la corriente epistemológica en la que se sustenta (Long 2007; Kuhn 2011).

## **Corrientes teóricas del cambio ambiental desde una perspectiva histórica**

Existe un amplio abanico de estudios que buscan entender las dinámicas humano-ambiente desde una perspectiva espacial y, más específicamente, el proceso de CUSV. Cada uno de estos marcos parte de una postura teórica/epistemológica distinta, aunque algunos de ellos son complementarios o paralelos (Turner y Robbins 2008). Esta sección está dedicada a mostrar cómo algunas de las teorías que se han formulado para el análisis del cambio ambiental –incluido el CUSV– han interactuado para finalmente generar aproximaciones interdisciplinarias. Las teorías expuestas aquí se seleccionaron desde tres campos de conocimiento distintos: (1) las teorías económicas, (2) las teorías generadas desde la antropología o la sociología y (3) las teorías ecológicas o desde la geografía física. Se analizaron estas tres posturas en tres periodos históricos principales, finales de XIX, primera mitad del XX y la segunda mitad del XX.

Aunque todos estos estudios comparten los objetivos de entender cómo y por qué se da el cambio en el territorio, cada uno posee diferentes ventajas y limitaciones, y se pueden establecer cinco aspectos en los que todos estos marcos varían: el marco epistemológico, la aproximación al fenómeno, la escala espacio-temporal, el tipo de cobertura de interés y los factores considerados (Briassoulis 2000; Turner y Robbins 2008; Robbins 2012) (Fig. 1). Por ejemplo, los estudios económicos se han caracterizado por centrarse en la dinámica espacial de ciudades o zonas productivas (Wegener 1994; Irwin y Geoghegan 2001; Alonso 2014), mientras que los estudios de antropológicos y sociales se centran en los acuerdos y relaciones entre actores sociales que, finalmente, se traduce en la toma de decisiones (Jarosz 2006; Long 2007), o las teorías ecológicas, que se centran en entender la pérdida de la cobertura forestal (Veldkamp y Lambin 2001; Kolb *et al.* 2013).

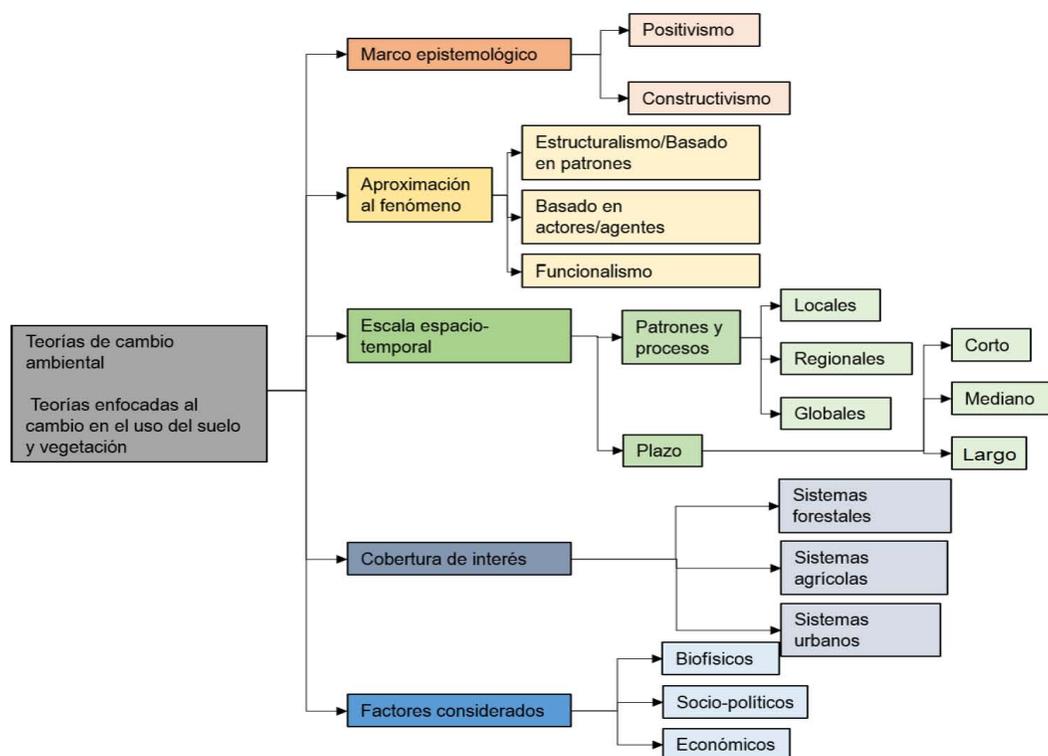


Figura 1. Clasificación de las teorías generadas para el análisis del cambio ambiental y de uso del suelo y vegetación. Se muestran los aspectos en los que contrastan marcos teóricos analizados

## Teorías del cambio ambiental en el siglo XIX

El análisis de la influencia humana sobre el medioambiente ha tenido una relevancia notable en el quehacer científico desde múltiples visiones, las cuales en un inicio se centraban en dilucidar las causas de la crisis social y ecológica (Briassoulis 2000; Robbins 2012). Destacan dos trabajos, realizados por von Thünen (1866) y Marsh (1864), que abordaban la relación hombre-naturaleza y que marcaron un punto de partida teórico para el análisis CUSV. Aunque ambos estudios tratan el cambio de uso de suelo de manera indirecta, los dos debaten el desarrollo de las sociedades humanas desde un enfoque espacial, considerando su impacto en los ecosistemas (Carr 1997; Briassoulis 2000; Robbins 2012). El primer autor brinda una explicación de la distribución espacial de las actividades agrícolas desde la geografía económica y, basándose en el utilitarismo, sugiere que es posible establecer los patrones de expansión y abandono agrícola (von Thünen 1866). Por su parte Marsh (1864) trata el efecto del factor antrópico sobre la matriz espacial, centrándose en la respuesta medioambiental desde la geografía física. La separación entre la naturaleza y la sociedad presente en ambos estudios es un rasgo influenciado por una visión causa-efecto directa; en este sentido los paisajes naturales se percibían como espacios ajenos a la sociedad, según Robbins (2012):

“La ausencia de personas dentro paisajes imaginarios no parece de ninguna manera extraña para la mayoría de nosotros; estos son los paisajes naturales, lugares apartados de las granjas, fábricas y la depredación de la humanidad.”

Desde esta visión, resultaba natural pensar que, al ser nosotros una parte ajena al sistema, la intrusión de la humanidad era la causa llana de la crisis ambiental, acentuada por el crecimiento poblacional, que se traducía en una intrusión continua y cada vez más intensa. Esta explicación dominó la arena de discusión hasta el siglo XX. A la par que la visión neo-malthusiana generó explicaciones al CUSV, disciplinas como la economía (urbana y regional), la sociología y la geografía (humana y física) generaron otras explicaciones que apuntaban a explicaciones más allá del incremento poblacional (Lambin *et al.* 2001; Carr *et al.* 2005).

## La divergencia teórica de la primera mitad del siglo XX

La primera mitad del siglo XX se caracterizó por avances en los estudios económicos cuantitativos enfocados al cambio de uso en el suelo. Éstos, en su mayoría, se centraban en entender la dinámica espacial a nivel regional, con base en la oferta y demanda de bienes, que a su vez son reguladas por el mercado. Teorías como la de los lugares centrales, generada por Christaller (1933) [citado en Ullman (1941)] y Lösch (1938), retomaban el marco de von Thünen para explicar la localización de ciertas actividades productivas, como la agricultura y las actividades terciarias, y no el cambio en el uso del suelo *per se*. La teoría de los lugares centrales abordaba el llamado orden espacial de las cosas, a través de la generación de regiones teóricas en las que se analizaba principalmente el mercado y no los procesos políticos o culturales, pues éstos constituían – de acuerdo con sus proponentes– cuestiones secundarias (Lösch 1938). Esta teoría trajo un enfoque analítico al proceso de CUSV, que después incorporaron múltiples aproximaciones, como la física social, teoría que buscaba explicar la distribución demográfica y del poder económico en el espacio (Stewart 1947; Zipf 1949). Por ejemplo, Zipf (1949), desde el marco de la ecología humana, pero incorporando elementos del marco de von Thünen, generó explicaciones para la expansión urbana con base en la relación entre ingreso y esfuerzo, que finalmente determinan la localización de las viviendas o las zonas productivas.

Otras teorías que retomaron el marco analítico, estructural y económico de von Thünen fueron las del cambio espacial basadas en accesibilidad del mercado (como las revisadas por Krzyzanowski 1927). La mayoría de estos estudios se fundamentaban en la corriente positivista<sup>1</sup> y en la doctrina económica del *laissez-faire*<sup>2</sup> (Rindfuss *et al.* 2004).

---

<sup>1</sup> De acuerdo con Fischer (2000) el positivismo es una corriente epistemológica que sostiene que la realidad existe por sí misma y está determinada por leyes causa-efecto que pueden ser descritas a través de ensayos empíricos y prueba de hipótesis. Por lo cual, la observación objetiva de estas leyes no debe depender del contexto social o histórico del individuo que observa.

<sup>2</sup> El francés *laissez-faire*, en español “dejar hacer”, se refiere a la doctrina económica que –en respuesta al mercantilismo– boga por la libre operatividad del sector privado sobre el control de la propiedad, sin la intervención del Estado (Midgley y Livermore 2009).

De manera simultánea al surgimiento de las teorías económicas, la sociología realizó propuestas notables, algunas en respuesta de los enfoques económicos (Zipf 1949; Briassoulis 2000; Turner y Robbins 2008). Un ejemplo de ellas es el surgimiento de la ecología humana, con un marco teórico que describe los patrones espaciales físicos, incorporando conceptos de la ecología y la geografía, y considerando los procesos económicos y sociales como fenómenos derivados (McKenzie 1967; Park *et al.* 1967; Turner *et al.* 2007). El marco de la ecología humana incorporó conceptos como comunidad, invasión y sucesión, como base para explicar el proceso de cambio ambiental. La mayoría de estos conceptos estaban fundamentados en una postura funcionalista, en la que los sistemas socioambientales están constituidos por partes divisibles que funcionan en conjunto. A diferencia de las teorías económicas de la época (como la de los lugares centrales), la ecología humana partía desde un enfoque descriptivo y no analítico, el cual establecía una relación entre la función y la forma (estructura) de un paisaje (Zipf 1949; Park *et al.* 1967).

De manera paralela a la postura funcionalista presentada por la ecología humana, la ecología cultural esgrimió una explicación determinista del cambio ambiental con base en la relación entre la cultura y el ambiente. Para este marco teórico en cada sistema socioambiental existía un núcleo cultural básico constituido por el ambiente y la tecnología, por lo cual, sin importar las diferencias en otros rasgos culturales como instituciones, normas y acuerdos sociales, era posible generalizar explicaciones debido a que el ambiente era el factor fundamental para explicar el sistema de producción. El ambiente, a su vez, estaba influenciado por leyes generales como los ciclos biogeoquímicos o la competencia por los recursos limitantes (Robbins 2012). Las posturas económicas, así como la ecología humana y cultural, entendían los cambios en el espacio como respuestas mecánicas y, por lo tanto, modelables; las primeras basadas en el mercado, la ecología humana basada en el funcionamiento de una determinada actividad y la ecología cultural basada en el trabajo y la subsistencia.

Otro grupo de teorías en torno al cambio ambiental, enfocadas principalmente al proceso del CUSV, fueron los de la geografía física y humana. Éstas retomaron la discusión de Marsh,

desde la escuela alemana del *Landschaft* (i.e. paisaje), lo que dotó a estas teorías de una gama amplia de metodologías para abordar el cambio en el paisaje, la mayoría de ellas espacialmente explícitas (Turner y Robbins 2008). Aunque algunos de estos marcos incorporaban algunos elementos de las ciencias sociales –particularmente la antropología, por parte de la geografía humana–, se basaban en el determinismo ambiental (el control de los factores inorgánicos sobre los orgánicos) y las corrientes epistemológicas del empirismo y positivismo, generando explicaciones centradas en correlaciones entre factores a escala regional o local y el CUSV (Moss y Turner 2007; Sauer 2007; Turner y Robbins 2008; Robbins 2012). Un ejemplo del enfoque empírico positivista es la teoría de la morfología espacial, propuesta por Sauer (2007), quien a pesar de considerar componentes sociales y culturales, establece unidades estructurales definidas, principalmente por sus componentes biofísicos, demográficos y económicos (Sauer 2007).

Como se mostró hasta ahora, la primera mitad del siglo XX se caracterizó por el desarrollo de diversos marcos teóricos que abordaban el cambio ambiental o el CUSV desde los enfoques descriptivo y analítico, principalmente (Fig. 1). Algunos de estos marcos provenían de la sociología, la económica o de la geografía. Gracias a estas diferentes posturas, los estudios ya incluían componentes a diferentes escalas y de distinta naturaleza, aunque cada marco otorgaba una importancia distinta a cada grupo de factores.

## **La explosión teórica de los estudios de cambio ambiental en la segunda mitad del siglo XX**

La segunda mitad del siglo XX se caracterizó por una explosión de estudios enfocados al CUSV, algunos de ellos contruidos gracias a la discusión crítica de los marcos de la primera mitad del siglo XX. Los estudios de este periodo comprendían desde escalas locales hasta globales, en ramas como la macro- y la microeconomía, la sociología rural/urbana, la geografía física y la ecología del paisaje (Briassoulis 2000; Robbins 2012). Antes de la década de 1970, los estudios monodisciplinarios dominaban las publicaciones; posteriormente comenzaron a surgir los enfoques multidisciplinarios. Esto permitió una revolución en la investigación al incorporar múltiples enfoques y teorías para explicar el cambio ambiental (Castree *et al.* 2014). Este aspecto

se vio motivado por el interés, desde la esfera política y los tomadores de decisiones, en los efectos del cambio global –y el CUSV como parte de éste– lo que impulsó el desarrollo de teorías que incluyeran cuestiones ambientales, económicas y sociales (Li *et al.* 2005; Agrawal y Ostrom 2006; Liu *et al.* 2007; Castree *et al.* 2014).

Entre las teorías económicas enfocadas al CUSV destacaban dos tipos, las que centraban las explicaciones en los procesos microeconómicos o macroeconómicos. Dentro del primer grupo de teorías, la mayoría se basaban en la racionalidad de la economía neoclásica y explicaban el cambio en el espacio a través de la competencia entre actividades económicas o entre modelos de producción; por ejemplo, las cantidades relativas de capital (incluido la disponibilidad de terrenos) y mano de obra determinan el proceso de producción –intensivo o extensivo– y, finalmente, la estructura del paisaje siempre está en función de la rentabilidad y la búsqueda por la eficiencia (Evans y Ilbery 1992; Hubacek *et al.* 2002). Por su parte, las teorías macroeconómicas se centraban en describir cómo los mercados regionales y globales influyen fuertemente en la toma de decisiones a nivel local, a pesar de reconocer el efecto de las estrategias comunitarias, así mismo, consideran el acceso diferencial a los recursos naturales entre diversos actores sociales. Estas teorías priorizaban el efecto de las políticas y el contexto global y nacional sobre el territorio, es decir, se basaban en la postura estructuralista<sup>3</sup> (Schmink 1994). En estos estudios se percibe una serie de diferencias con respecto a los realizados a principios del siglo XX, pues (1) se incluyen cuestiones cualitativas y no sólo cuantitativas, aunque desde una postura determinista y (2) se utilizan conceptos de otros marcos (Agarwal *et al.* 2002; Robbins 2012).

Por su parte, desde la antropología y la sociología se formaron nuevos enfoques para analizar el cambio ambiental y el CUSV. En este periodo, se hacen más frecuentes los marcos que integran aspectos cuantitativos, como los análisis de área social y los análisis de factores

---

<sup>3</sup> El estructuralismo es un cuerpo de pensamiento que supone que los eventos de cambio ambiental y social están determinados por la estructura general del sistema, es decir, que el contexto social, económico, cultural y biofísico a gran escala moldean los cambios a nivel local (Lawrence 1989; Jarosz 2006; Long 2007).

(Briassoulis 2000). Estos marcos se enfocan en evaluar el efecto de la demografía, las instituciones (políticas), las políticas públicas basadas en subsidios y el ambiente físico (factores biofísicos) sobre el proceso de cambio espacial, desde una perspectiva inductiva. Un cambio importante en las teorías sociales de cambio ambiental de la época fue la inclusión del concepto de “poder” en sus explicaciones (por ejemplo, Cash *et al.* 2006; North 1990; Clement 2010; Robbins 2012). La influencia del poder se abordó de diversas maneras, pero entre ellas destaca la introducción del concepto de capacidad de agencia<sup>4</sup> y los análisis sobre la influencia diferencial en la distribución de costos y beneficios de cada actor o institución, así como la capacidad de modificar y responder ante cambios estructurales (Wilshusen 2003; Raik *et al.* 2008). En la última parte del siglo, gracias al desarrollo de enfoques interdisciplinarios, el análisis de los cambios ambientales y del CUSV se abordó desde la perspectiva de la ecología política<sup>5</sup>. La ecología política llegó a ser una aproximación especialmente útil, pues considera las asimetrías de poder en las relaciones sociales, el marco de la economía política y los factores estructurales (con conceptos como el desarrollo), los procesos de organización social y de toma de decisiones y la ecología, para analizar el CUSV (Blaikie *et al.* 1987; Bryant y Bailey 1997; Long 2007; Raik *et al.* 2008; Brenner y Rosales Ortega 2015).

Finalmente, los estudios desde los enfoques de la geografía física y la ecología del paisaje reinterpretaron el concepto de paisaje al incorporar la perspectiva histórica, fuertemente influenciados por corrientes como el materialismo histórico y el realismo, a la par que criticaban el alcance de los modelos generados desde el empirismo y el positivismo, debido a la sobre-simplificación de la realidad (Ciriacy-Wantrup 1964). Esto acercó los enfoques geográficos

---

<sup>4</sup> Se entiende como agencia a la capacidad, de cada individuo o grupo, de actuar de manera independiente para lograr sus propios intereses, objetivos y decisiones (Robbins 2012).

<sup>5</sup> La ecología política se ha caracterizado por ser un marco puramente interdisciplinario, por lo que incorporó, además, conceptos desde el feminismo, el post-colonialismo y el posestructuralismo. Ejemplos como el análisis de la estructura del poder entre grupos y cómo ésta regula las relaciones y acuerdos del acceso a los recursos, que finalmente se traduce en determinadas consecuencias, tanto ambientales como sociales.

a la teoría social. Paralelamente, la revolución tecnológica de finales de siglo en los sistemas de información geográfica y percepción remota abrió un nuevo panorama para la modelación del CUSV, al ofrecer información a distintas escalas espacio-temporales (Cohen y Goward 2004). Tanto la revolución tecnológica, como teórica permitieron el surgimiento de teorías que utilizaban de lleno metodologías espaciales, a la vez que echaban mano de análisis de contextos sociales y económicos (Gallopín 2006; Herrmann *et al.* 2014).

A manera de resumen, se puede decir que, en lo que respecta a teorías que abordan el cambio ambiental, y el fenómeno del CUSV específicamente, se demarcan 3 tipos de enfoques, centrados cada uno, de forma predominante en: los componentes ambientales, sociales o económicos. En realidad, son pocas las teorías que (1) tratan al cambio como un fenómeno influenciado por factores con distintas escalas y naturaleza, (2) consideran el cambio como un proceso estrictamente dinámico –es decir, que éste genera también nuevas características económicas, socio-culturales y ecológicas, y viceversa– y (3) generan explicaciones construidas desde múltiples visiones teóricas (Briassoulis 2000). En la Figura 2, se muestra un esquema de la evolución teórica presentada en esta sección.

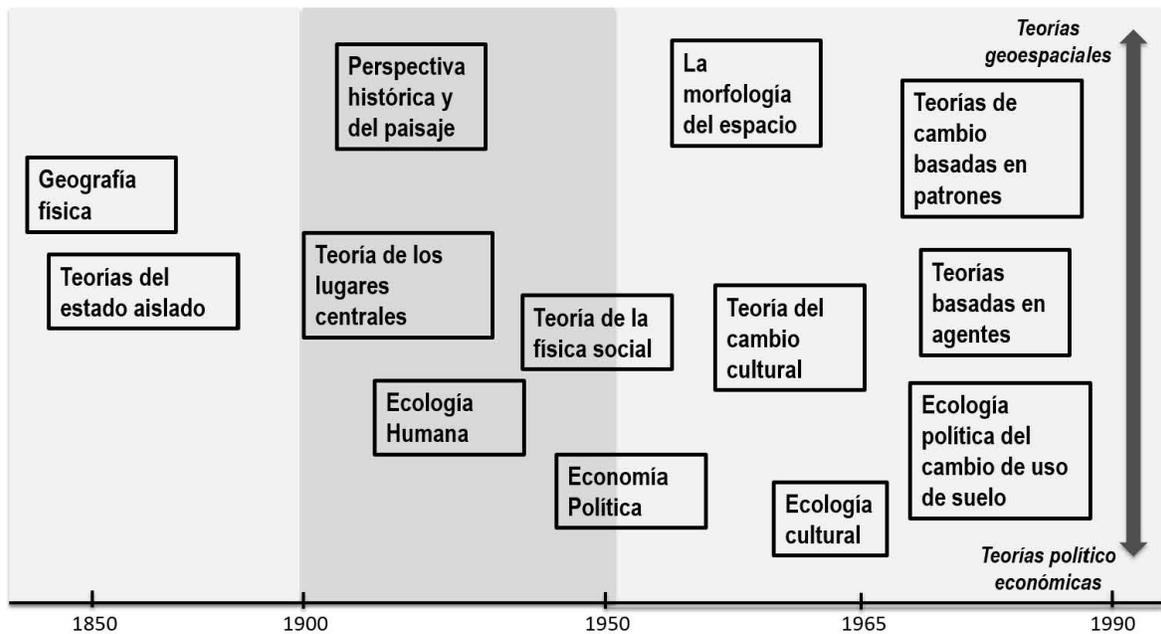


Figura 2. Corrientes teóricas del cambio en el espacio. Modificada de Robbins (2012); Turner y Robbins (2008)

## Marco metodológico

### Factores explicativos en el CUSV

La intersección entre los múltiples factores involucrados en el CUSV y sus relaciones rebasa los alcances explicativos de una sola disciplina del conocimiento e invita a la interacción horizontal entre disciplinas (*i.e.* interdisciplina; Turner y Robbins 2008). A pesar de que en la actualidad es posible describir y mapear numerosos procesos de cambio en el territorio, así como reconocer algunas de las causas directas rápidamente, nuestros modelos conceptuales continúan evolucionando, desde modelos simples causa-efecto, que incorporan someramente nociones de las ciencias naturales y sociales; hasta explicaciones sofisticadas que incorporan causas y procesos en múltiples escalas, efectos ambientales y sociales, y procesos de retroalimentación (Reid *et al.* 2000; Veldkamp y Lambin 2001). Dichos modelos proveen, actualmente, de una importante plataforma analítica para la toma de decisiones; no obstante, aún existen importantes retos metodológicos por ser atendidos.

Para la generación de explicaciones interdisciplinarias se deben tener presentes cuáles son las ventajas operativas de cada teoría y su respectivo modelo. Un problema central es que la información incorporada en el análisis suele ser de distinta naturaleza. Por un lado, se puede tener variables cuantificables y otras no cuantificables o de difícil medición. De acuerdo con algunos autores (Carr 1997; Jessop 1997; Agarwal *et al.* 2002; Vásquez-León y Liverman 2004; Campbell *et al.* 2005; Li *et al.* 2005; Agrawal y Ostrom 2006), una mejor alternativa para atacar este problema es utilizar una síntesis de algunos enfoques teóricos, la cual rescate las fortalezas de cada una (Rindfuss *et al.* 2004).

Algunos estudios incorporan distintos marcos teórico-metodológicos mediante la construcción de modelos interdisciplinarios. Castella y Verburg (2007), por ejemplo, desarrollaron un modelo para evaluar el CUSV desde dos enfoques, el regional y el local. Ambos incorporaban, en cierto punto, el análisis de tasas de cambio, la correlación entre variables biofísicas y socioeconómicas con determinado tipo de cambio, así como el análisis de los acuerdos

entre actores sociales para el uso del suelo. Por otro lado, el estudio realizado por Vázquez-León y Liverman (2004) presenta un análisis estructural desde la ecología política para examinar las interacciones entre factores ambientales, políticos y económicos, y los cambios en el uso a diferentes escalas; además, abordan el valor que los actores asignan a los sistemas ecológicos y el efecto de las interacciones entre los seres humanos y el medio ambiente sobre el proceso de CUSV.

En el presente estudio se desarrolla un análisis de los factores que configuran la dinámica del CUSV en dos municipios del istmo oaxaqueño, en México, integrado dos enfoques distintos pero complementarios; por un lado, un análisis basado en patrones, empleando un modelo de autómatas celulares estocástico/determinístico y, por el otro, un análisis estructural y basado en la perspectiva local desde el marco de la ecología política (Fig. 3). Las preguntas de investigación que guiaron esta investigación son ¿qué factores son relevantes para explicar el CUSV?, ¿cómo se pueden complementar un análisis cualitativo y otro cuantitativo para entender mejor la dinámica del CUSV? y finalmente ¿qué ventajas y desventajas representa utilizar dos marcos complementarios de análisis? A continuación, se presenta una breve descripción del enfoque metodológico de los dos análisis propuestos en este estudio y los objetivos propuestos para esta investigación.

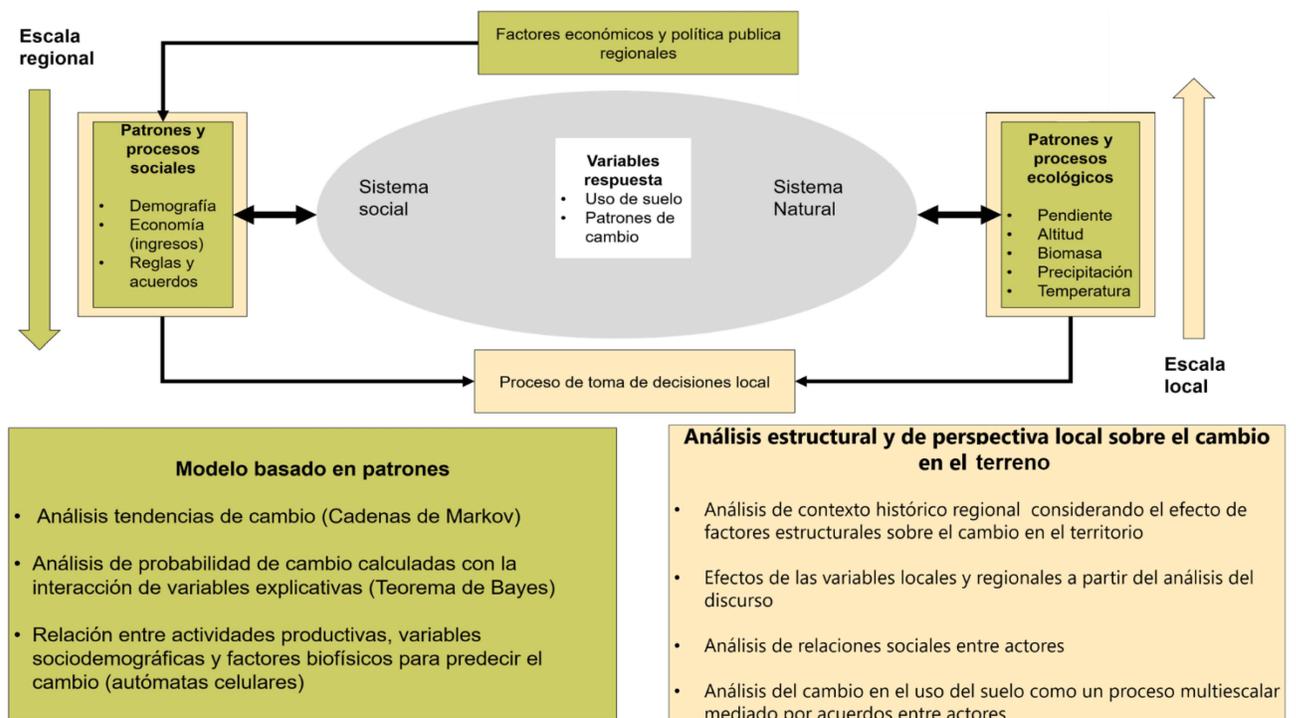


Figura 3. Modelo integral propuesto para el análisis de cambio en el uso del suelo y la vegetación, en distintos colores se indican los enfoques metodológicos analizados en este estudio, así como el componente del sistema en el que se centran. Elaboración propia.

## Modelo basado en patrones

El modelo basado en patrones está fundamentado en la hipótesis de que el cambio de los diferentes usos de suelo depende del arreglo espacial de las diferentes clases, así como del contexto económico, demográfico, político y biofísico a escala regional (Burgos y Maass 2004; Cinner *et al.* 2012). De manera general, muchos de los modelos basados en patrones se abordan desde el análisis de los potenciales de cambio de un uso de suelo a otro. Una manera de analizar el potencial de cambio en función de distintas variables explicativas es el cálculo de pesos de evidencia, que son calculados con la frecuencia de transición en cada rango de distribución de diferentes variables independientes. Se puede complementar el análisis de potenciales de cambio con un modelo de autómatas celulares que utilice estos potenciales de transición para dotar de un comportamiento único a cada pixel (unidad mínima de análisis), lo que permite entender la transformación espacio temporal del paisaje (Soares-Filho *et al.* 2002, 2004; Weed 2005). Este modelo es especialmente útil en sitios donde contrastan políticas públicas enfocadas a la

conservación y al sector productivo, sitios con un alto dinamismo demográfico y sitios donde el principal cambio en el uso del suelo es de bosque a agricultura (Soares-Filho *et al.* 2004). Además, permite incorporar, tanto variables cualitativas como cuantitativas, lo que da como resultado cálculos por tipo de transición muy confiables (Cuevas y Mas 2008; Kolb *et al.* 2013; Mas *et al.* 2014).

## **Análisis estructural y de perspectiva local del CUSV desde la ecología política**

Los análisis estructurales y de perspectiva local abordados desde la ecología política examinan cómo los procesos de cambio ambiental –como el CUSV– están influenciados por las decisiones de las personas y por procesos socioculturales, económicos y ecológicos que ocurren a diferentes escalas (Vásquez-León y Liverman 2004). El enfoque de ecología política presente en este tipo de análisis permite entender procesos locales insertos en determinado contexto ambiental y socioeconómico. Aunque en ocasiones ponen mayor énfasis en los aspectos políticos que en los ecológicos, estos análisis permiten abordar problemas ambientales complejos, pues no sólo contemplan la relación de factores directos e indirectos con el cambio espacial a través de la historia, sino que también se centran en el entendimiento de cómo la cultura y las relaciones sociales asimétricas determinan el proceso de toma de decisiones (Bryant y Bailey 1997; Escobar 1999; Jarosz 2006). Por último, el análisis desde la perspectiva local permite examinar cómo, a pesar de que los factores estructurales, como los económicos y la política pública, influyen en el uso de la tierra, los actores locales, tiene la capacidad de resistir, hacer frente, adaptarse y, en cierta medida, transformar la forma en que influyen los factores estructurales de mayores escalas en la escala local (Blaikie *et al.* 1987; Vásquez-León 1999; Vásquez-León y Liverman 2004; Long 2007).

## Objetivos

Este estudio tiene por objetivo principal analizar la influencia de un conjunto de factores y procesos biofísicos, políticos, sociales y económicos en la dinámica del uso del suelo, en la porción oaxaqueña del Istmo de Tehuantepec, al sur de México, integrando dos enfoques de análisis. Este objetivo se aborda a través de los siguientes objetivos particulares:

1. Analizar la dinámica de CUSV en el periodo de 1985-2015 en dicha región.
2. Analizar cuantitativamente la influencia de un conjunto de factores biofísicos, económicos, sociodemográficos y de política pública en el CUSV.
3. Analizar cualitativamente la relación entre procesos sociopolíticos y económicos, a distintas escalas, y el CUSV.

# Método

## Sitio de estudio

El análisis de los factores que influyen en el CUSV se realizó en dos municipios de la porción oaxaqueña del Istmo de Tehuantepec, al sur de México (Fig. 4 a). Esta región posee una alta diversidad biológica, buena parte de la cual se encuentra en áreas cubiertas por selva baja caducifolia, cuya distribución potencial abarca 28 % del territorio del estado de Oaxaca (Meave *et al.* 2012). Además de la selva baja caducifolia, en esta región se presentan sabanas, matorrales xerófilos, selvas medianas subcaducifolias y selvas altas perennifolias (Pérez García *et al.* 2001; Miranda y Hernández-X. 2014). Por otro lado, el contexto socioeconómico y político, tanto regional como nacional, hace del Istmo de Tehuantepec una zona estratégica para el desarrollo económico, particularmente a partir de principios del siglo XX (Hernández *et al.* 2009). Entre los procesos socioambientales más importantes en dicho periodo destacan la construcción del sistema ferroviario, el desarrollo de la industria petroquímica, el proceso de ganaderización, la Revolución Verde y la inmigración dirigida por el Estado (Coronado Malagón 2009; Hernández *et al.* 2009; Léonard 2009; Prévôt-Schapira 2009; Rodríguez 2014). Además, la industria energética eólica ha puesto especial interés en la zona en los últimos años (Juárez-Hernández y León 2014).

Específicamente, el estudio se realizó en los municipios Ciudad Ixtepec y Asunción Ixtaltepec, ambos con extensiones considerables de selva baja caducifolia (40 % de la cobertura forestal). En conjunto, éstos tienen un área total de 120,941.5 ha (Fig. 4 b). El municipio Ciudad Ixtepec se caracteriza por la presencia de un asentamiento urbano que da nombre al municipio y que cuenta con una población de ca. 26,500 habitantes (INEGI 2010) y por la presencia de superficies agropecuarias, tanto de riego como de temporal, mientras que el segundo municipio se caracteriza por asentamientos de mediana y baja densidad, y grandes extensiones de agricultura de temporal y pastizales inducidos, estos últimos comúnmente establecidos en sabanas arboladas y no arboladas comunes en el centro norte del municipio.

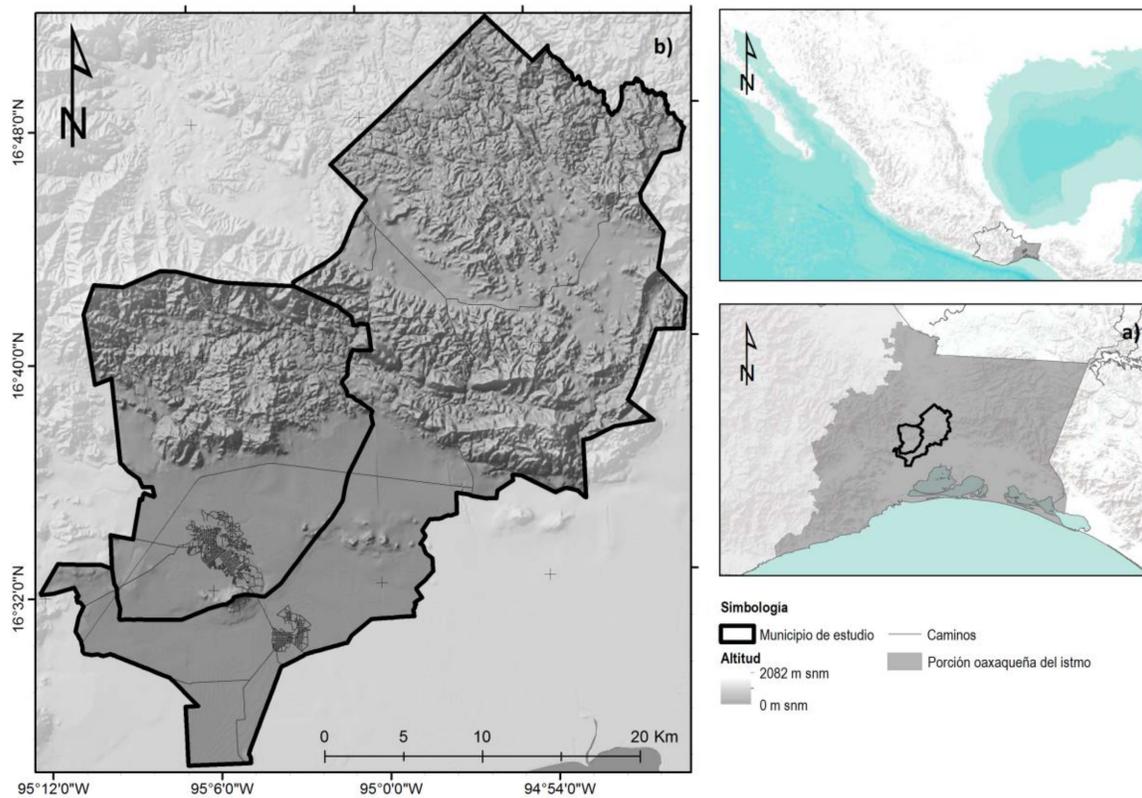


Figura 4. Localización geográfica del sitio de estudio, (a) porción oaxaqueña del istmo de Tehuantepec y (b) municipios de estudio.

## Análisis de cambio en el uso de suelo y la vegetación

El análisis de cambio en el uso del suelo y la vegetación consistió en 4 pasos importantes: (1) describir el proceso de CUSV en 30 años, (2) determinar qué variables son significativas para explicar el CUSV (2) buscar el mejor modelo de simulación para entender la dinámica espacio temporal del paisaje, y (3) construir el contexto histórico de la región y su relación con el cambio en el territorio. La primera cuestión se abordó a partir del desarrollo de modelos lineales generalizados de efectos mixtos, los cuales evalúan el efecto independiente que tiene cada variable para explicar la transición de una clase de uso de suelo a otra. Los resultados obtenidos de este modelo se incorporaron a las variables de entrada del modelo basado en patrones, con el cual se calcula el potencial de transición de cada pixel (autómata celular). El potencial de transición se obtiene evaluando la influencia conjunta de cada variable explicativa, usando el teorema de Bayes. Por último, los resultados generados por el algoritmo de autómatas celulares fueron contrastados

con un análisis estructural cualitativo desde la perspectiva de la ecología política, que incorporó el contexto biofísico, socioeconómico y político a escala local y extralocal (*i.e.* regional, nacional y global), para entender el vínculo entre la transformación en el uso del suelo, los factores que le dan forma y el proceso de toma de decisiones a escala local.

## **Construcción de las bases de Datos**

El desarrollo del análisis de CUSV se realizó con base en información derivada del estudio realizado por Calzada *et al.* (2018) (Anexo 1), la cual se modificó para obtener mapas de cobertura del suelo de los municipios de Asunción Ixtaltepec y Ciudad Ixtepec, en los años 1986, 1997, 2004, 2011 y 2015, derivados de clasificaciones supervisadas de imágenes Landsat<sup>6</sup>. Cada mapa de uso de suelo muestra 12 clases de uso de suelo y vegetación<sup>7</sup>, que para este estudio se reclasificaron en cuatro clases principales, 1) zonas agrícolas y pecuarias, 2) asentamientos humanos e infraestructura, 3) superficies cubiertas por vegetación primaria y 4) superficies cubiertas por vegetación secundaria, de acuerdo con su firma espectral y textura. Adicionalmente, se obtuvo y sistematizó información cartográfica y datos censales de repositorios gubernamentales para la construcción de 25 variables explicativas. El Cuadro 1 muestra el total de variables analizadas, así como el geoprocesamiento previo necesario para su análisis espacial.

---

<sup>6</sup> El método de clasificación supervisada, así como el pre- y post-procesamiento de imágenes satelitales empleados para la obtención de mapas temáticos de uso de suelo, así como el análisis de transición entre años se detalla en Calzada *et al.* (2018).

<sup>7</sup> Las clases de uso de suelo se obtuvieron de Calzada *et al.* (2018), Miranda y Hernández-X. (2014) y Pérez-García *et al.* (2012), y son: selva baja caducifolia, selva baja espinosa, selva mediana subcaducifolia, selva alta subperennifolia, sabanas, sabanas con encino, sabanas con pino, vegetación secundaria, agricultura, pastizal inducido, suelo desnudo y asentamientos humanos

Cuadro 1. Información cartográfica empleada para el análisis de factores explicativos del cambio en la cobertura del suelo. Se presenta el geoprocesamiento previo, las unidades y la fuente de información para cada variable.

Variable	Escala	Geoprocesamiento previo/unidades	Unidades	Fuente
Distancia a zonas agropecuarias	Ráster-15 m/pixel	Cálculo de distancia euclidiana	m	Elaboración propia desde clasificaciones de uso de suelo
Distancia a asentamientos humanos	Ráster-15 m/pixel	Cálculo de distancia euclidiana	m	Elaboración propia desde clasificaciones de uso de suelo
Altitud	Ráster-15 m/pixel	NA*	m snm	Continuo digital de elevaciones (INEGI 2013a)
Pendiente	Ráster-15 m/pixel	Cálculo de pendiente	grados	Continuo digital de elevaciones (INEGI 2013a)
Orientación de ladera	Ráster-15 m/pixel	Análisis de orientación azimutal	grados azimutales	Continuo digital de elevaciones (INEGI 2013a)
Tipo de suelo	1:100 000	Categorización de tipo de suelo	NA	Carta edafológica/geológica regional (INEGI 2013 b)
Tipo de roca	1:100 000	Categorización de tipo de roca	NA	Carta edafológica/geológica regional (INEGI 2013 b)
Distancia a ríos, canales de riego y cuerpos de agua	Ráster-15 m/pixel	Cálculo de distancia euclidiana	m	Carta hidrológica 1:20,000 (INEGI 2015)
Distancia a caminos	Ráster-15 m/pixel	Cálculo de distancia euclidiana	m	Red Nacional de Caminos (INEGI 2017)
Precipitación promedio	Ráster-15 m/pixel	Promedio decadal de la Interpolación de la distancia ponderada del acumulado mensual de precipitación de 10 estaciones meteorológicas**	mm	Datos climáticos históricos (SMN 2018)
Temperatura promedio	Ráster-15 m/pixel	Promedio decadal de la Interpolación de la distancia ponderada del acumulado mensual de temperatura de 10 estaciones meteorológicas**	°C	Datos climáticos históricos (SMN 2018)
Evaporación potencial promedio	Ráster-15 m/pixel	Promedio decadal de la Interpolación de la distancia ponderada del acumulado mensual de evaporación potencial de 10 estaciones meteorológicas**	mm	Datos climáticos históricos (SMN 2018)
Tipo de tenencia de la tierra	1: 20, 000	Categorización de núcleos agrarios	NA	Registro de propiedad social en el estado de Oaxaca (RAN 2016)
Organización intracomunitaria para el uso del suelo (Uso común y parcelario)	NA	Categorización de núcleos agrarios	NA	Registro de propiedad social en el estado de Oaxaca (RAN 2016)
Presencia de ADV <sup>c</sup>	NA	NA	NA	Capa vectorial de áreas naturales protegidas (CONANP 2016)
Distancia a aerogeneradores	Ráster-15 m/pixel	Cálculo de distancia euclidiana	m	Conjunto de datos relacionados con proyectos de generación de energía (GEOCOMUNES 2017)

Variable	Escala	Geoprocesamiento previo/unidades	Unidades	Fuente
Población total	Núcleo agrario	Regionalización y suma de datos por localidad	Número de habitantes	Censo nacional de población y vivienda (INEGI 1990;2000;2010)
PEA <sup>+</sup> total	Núcleo agrario	Regionalización y suma de datos por localidad	Número de habitantes	Censo nacional de población y vivienda (INEGI 1990;2000;2010)
PEA primaria	Núcleo agrario	Regionalización y suma de datos por localidad	Proporción con respecto al total	Censo nacional de población y vivienda (INEGI 1990;2000;2010)
Número de UP <sup>#</sup> aseguradas por núcleo agrario	Núcleo agrario	Regionalización y suma de datos por localidad	Conteo de UP	Censo agropecuario nacional (INEGI, 1991; 2007)
Número de UP que recibieron créditos agrícolas por núcleo agrario	Núcleo agrario	Regionalización y suma de datos por localidad	Conteo de UP	Censo agropecuario nacional (INEGI, 1991; 2007)
Número de UP que recibieron capacitaciones por núcleo agrario	Núcleo agrario	Regionalización y suma de datos por localidad	Conteo de UP	Censo agropecuario nacional (INEGI, 1991; 2007)
Número de tractores por núcleo agrario	Núcleo agrario	Regionalización y suma de datos por localidad	Conteo	Censo agropecuario nacional (INEGI, 1991; 2007)
Presencia de cooperativas agrarias	Núcleo agrario	Regionalización y suma de datos por localidad	NA	Censo agropecuario nacional (INEGI, 1991; 2007)
Número de UP que destinan parte o toda su producción a la venta	Núcleo agrario	Regionalización y suma de datos por localidad	Conteo de UP	Censo agropecuario nacional (INEGI, 1991; 2007)
Número de UP que utilizan fertilizantes o herbicidas químicos	Núcleo agrario	Regionalización y suma de datos por localidad	Conteo de UP	Censo agropecuario nacional (INEGI, 1991; 2007)
Número total de reses	Núcleo agrario	Regionalización y suma de datos por localidad	Número de cabezas	Censo agropecuario nacional (INEGI, 1991; 2007)
Reses en libre pastoreo	Núcleo agrario	Regionalización y suma de datos por localidad	Número de cabezas	Censo agropecuario nacional (INEGI, 1991; 2007)

NA (no aplica), \* Sin geoprocesamiento adicional, \*\* El método empleado para la obtención de rásters por medio de interpolaciones de datos obtenidos de estaciones meteorológicas se detalla en Ozelkan *et al.* (2015), <sup>□</sup> Áreas destinadas voluntariamente a la conservación, <sup>†</sup> Población económicamente activa, <sup>#</sup> Unidades de producción.

## Modelos lineales generalizados de efectos mixtos

Después de sistematizar las variables explicativas y de respuesta, se procedió a realizar un agregado espacial en una gradilla hexagonal de 238 ha, el área de los hexágonos se obtuvo al calcular el área promedio de unidad de producción. Una unidad de producción es el área de acción de un productor o grupo de productores que toman decisiones en conjunto, por lo cual es una buena

aproximación para entender el proceso de CUSV (Fig. 5). Una vez definidos estos hexágonos, se calcularon los valores promedio y modas para las variables explicativas continuas y nominales, respectivamente, y se hizo el conteo de pixeles que presentaron cambios por unidad de producción promedio. Este procedimiento se llevó a cabo con la finalidad de permitir el cálculo de modelos lineales generalizados de efectos mixtos (GLMM, por sus siglas en inglés) con una distribución Poisson y una aproximación a la normal por método de Laplace en el programa R, utilizando el paquete *lme4* (Bates *et al.* 2015). Los GLMM son una extensión de los modelos lineales generalizados; sin embargo, los GLMM son especialmente útiles para datos que presentan algún tipo de agregación. Los GLMM establecen relaciones entre un grupo de variables explicativas y una variable respuesta, considerando los efectos fijos y los aleatorios.

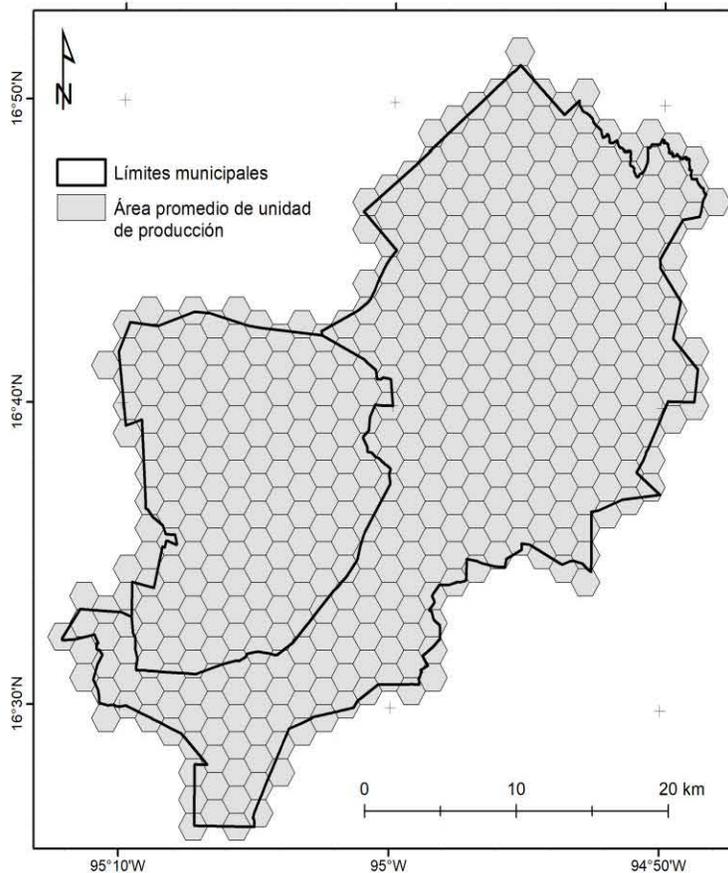


Figura 5. Gradilla hexagonal con áreas promedio de unidades de producción en los municipios de estudio.

Los GLMM se utilizaron como paso intermedio en la selección de variables que explican de mejor manera el proceso de CUSV, considerando la correlación entre variables. El proceso de selección constó en identificar el modelo con el valor más bajo en el criterio de información de Bayes (BIC), así como de todos los modelos que tuvieran una diferencia en el valor de BIC < 2, con respecto al valor mínimo obtenido. En total, se calcularon 1,297,027 regresiones seleccionadas al azar, de un total de 3,413,604 regresiones posibles. Para obtener el número total de selecciones posibles, se consideró la combinación de modelos con 15 hasta 24 variables, dada su correlación. En la sección de anexos se muestra el correlograma de Spearman entre variables explicativas cuantitativas. La ecuación básica de todos los modelos construidos se muestra en la Eq. 1.

*Ecuación 1*

$$C = x_1 + x_2 + \dots + x_i + (1|NUC\_AGR) + (1|AÑO)$$

donde C es el conteo de pixeles que presentaron cambio en alguno de los periodos, en cada uno de los hexágonos, x representa las diferentes variables explicativas, NUC\_AGR es la pertenencia de cada unidad de producción promedio (gradilla hexagonal) a los diferentes núcleos agrarios (ejidos o comunidades agrarias<sup>8</sup>) y AÑO es el periodo en el que ocurrió cada cambio. Estas variables se usaron como efectos aleatorios, al ser la unidad de agregación espacial y temporal básica

Este método se eligió como estrategia de preselección de variables, por encima de otros métodos, como las particiones jerárquicas, los modelos de discriminación lineal, el análisis de

---

<sup>8</sup> Tanto los ejidos como las comunidades agrarias son un tipo de tenencia de la tierra en México. Los ejidos, son dotaciones de tierras derivadas de los compromisos adquiridos a raíz del movimiento revolucionario mexicano, a inicios del siglo XX, con la elaboración de la Constitución de 1917. Los ejidatarios poseen la propiedad social y su acceso al territorio en un sistema dualizado, con parcelas individuales en usufructo y recursos comunes a los que pueden acceder todos los miembros de manera reglamentada (Braña Varela y Martínez Cruz 2005). Por su parte, las comunidades agrarias restituciones de tierras por decreto presidencial, en respuesta a la exigencia de los pueblos indígenas por recobrar terrenos que les fueron expropiados a raíz de las leyes de reforma de 1857. En la mayoría de los casos, los comuneros tienen acceso a los recursos y al uso de la tierra, regulado por un reglamento interno y una asamblea (Bartra 1972; Merino-Pérez y Segura-Warnholtz 2007).

componentes principales y los modelos de ecuaciones estructurales. Estas alternativas se pusieron a prueba simultáneamente a la aplicación de los GLMM. En el cuadro del Anexo 3, se detallan las características de cada modelo, así como sus limitaciones en comparación con los GLMM.

### **Modelo basado en patrones.**

El modelo basado en patrones considera la interacción de factores biofísicos, entre los que destacan las condiciones climáticas, como la precipitación y la temperatura; las condiciones topográficas como la altitud y la pendiente, y las condiciones biofísicas como el tipo de suelo o el tipo de vegetación. Además, considera la relevancia de factores socioeconómicos, siempre y cuando éstos sean espacialmente explícitos, como es el caso de los cambios demográficos, los cambios en ingresos o la tenencia de la tierra. El modelo comprende cuatro fases principales: (1) la selección de variables explicativas, (2) el cálculo de tasas de transición mediante cadenas de Markov, (3) el análisis de la relación entre variables explicativas y los cambios por tipo de transición, empleando el teorema de Bayes, y (4) la generación de mapas de cambio mediante un algoritmo de autómatas celulares, donde cada celda posee un comportamiento determinístico único, en función de su arreglo espacial, su historia de uso, las tendencias de cambio regionales y la interacción de variables independientes, así como la generación de cambios estocásticos a partir del comportamiento de vecindario de cada tipo de cobertura (Fig. 6).

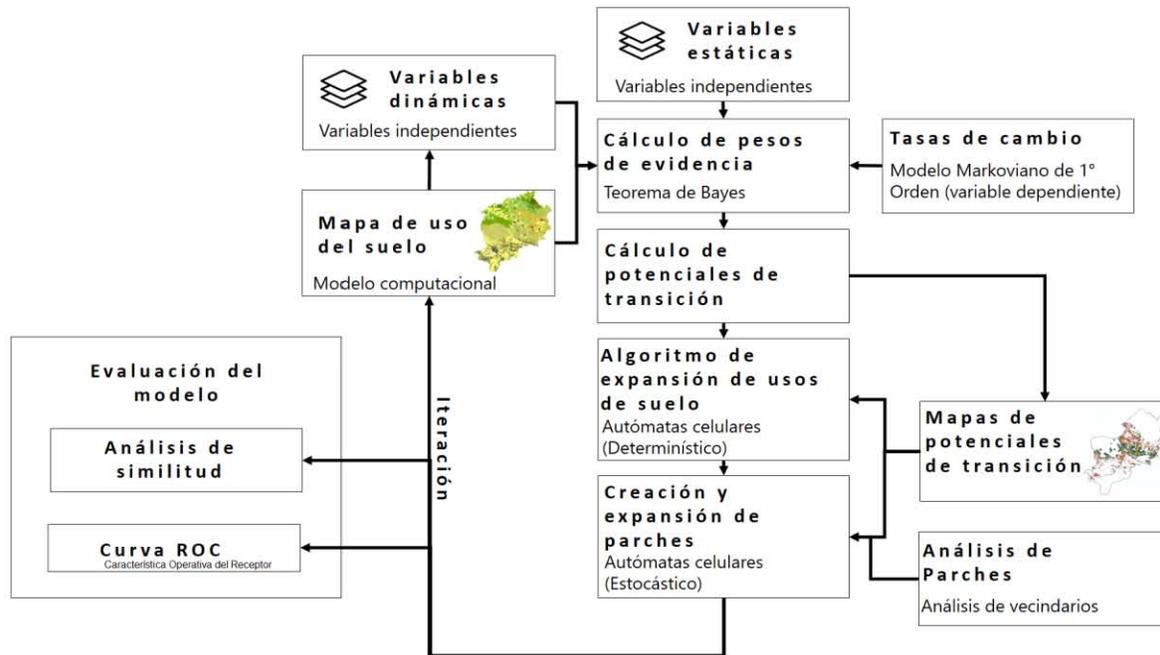


Figura 6. Modelo de cambio de uso de suelo basado en patrones a partir del análisis de pesos de evidencia y autómatas celulares.

### Selección de variables

El primer paso para el desarrollo del modelo basado en patrones consistió en extraer la configuración de variables con la mayor capacidad explicativa del proceso del CUSV, de acuerdo con el mejor modelo de GLMM. Éste se eligió con base en el BIC, comparado con todos los modelos desarrollados. Las variables *presencia de Áreas Destinadas Voluntariamente a la Conservación* y *distancia a aerogeneradores* fueron seleccionadas como variables explicativas en el modelo basado en patrones, a pesar de que no fueron evaluadas por los GLMM, debido a que son variables que surgieron en el último periodo de análisis (año 2011 y 2010 respectivamente). Dichas variables se incluyeron en el análisis ya que resultaron ser factores importantes, de acuerdo con la literatura y los testimonios de funcionarios y actores locales. Una vez seleccionadas las variables, se procedió a tipificarlas en dos categorías generales: variables estáticas y variables dinámicas. Las variables estáticas son aquellas que no modifican sus valores a través del tiempo, como la topografía o el tipo de suelo. Por el contrario, las variables dinámicas modifican sus

valores en cada periodo de análisis (e.g., precipitación promedio y distancia a zonas agrícolas). En el Cuadro 2 se especifican las variables seleccionadas, así como la categoría a la que pertenecen.

Cuadro 2. Variables espaciales consideradas para el modelo de cambio en el uso de suelo y vegetación con autómatas celulares. El Cuadro presenta el tipo de variable, las unidades y el intervalo de categorización.

Variable	Intervalo
<b><i>Dinámicas</i></b>	
Distancia a zonas agropecuarias	100 (m)
Distancia a asentamientos humanos	100 (m)
Distancia a caminos	100 (m)
Precipitación promedio	10(mm)
Temperatura promedio	1(°C)
Evaporación potencial promedio	10(mm)
Presencia de ADV <sup>□</sup>	Dicotómica (presencia/ausencia)
Distancia a aerogeneradores	100 (m)
Población total	500(habitantes)
PEA <sup>†</sup> total	500(habitantes)
Proporción PEA primaria	0.02 (% de la PEA total)
Cantidad de UP <sup>#</sup> aseguradas por núcleo agrario	20 (UP)
Cantidad de UP que recibieron créditos agrícolas por núcleo agrario	20 (UP)
Cantidad de UP que recibieron capacitaciones por núcleo agrario	20 (UP)
Cantidad de tractores por núcleo agrario	1(tractores)
Presencia de cooperativas agrarias	Dicotómica (presencia/ausencia)
Cantidad de UP que destinan parte o toda su producción a la venta	20 (UP)
Cantidad de UP que utilizan fertilizantes o herbicidas químicos	20 (UP)
Cantidad total de reses	100 (cabezas de ganado)
Reses en libre pastoreo	100 (cabezas de ganado)
<b><i>Estáticas</i></b>	
Altitud	100 (m)
Pendiente	10(°)
Orientación de ladera	10(°)
Tipo de suelo	Catagórica
Tipo de roca	Catagórica
Distancia a ríos, canales de riego y cuerpos de agua	100 (m)
Tipo de tenencia de la tierra	Catagórica
Asignación de linderos por núcleo agrario	Catagórica

□ Áreas destinadas voluntariamente a la conservación, † Población económicamente activa, # UP: Unidades de producción.

### **Cálculo de matrices de transición**

En la segunda fase, se calcularon las matrices de transición para cada periodo de análisis (1985-1995, 1995-2005, 2005-2011, 2011-2015), a partir de la comparación de dos diferentes clasificaciones supervisadas. Posteriormente, se emplearon cadenas de Markov de primer orden para calcular las tasas de transición por unidad de tiempo (año). El modelo Markoviano permite predecir las tasas de transición al tiempo  $t+1$ , empleando el estado del sistema en el tiempo  $t$ ; es decir, calcula la probabilidad de que una celda pase de  $i$  a  $j$  considerando las tasas de transición observadas. A continuación, por medio de iteraciones se puede obtener el lapso de tiempo deseado. En cada iteración el modelo calcula el estado del sistema en forma vectorial como se muestra a continuación:

$$x_t = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_i]$$

donde  $x_i$  es la proporción de celdas del tipo  $i$  en el tiempo  $t$ .

Para obtener el estado en el tiempo  $x_{t+1}$ , el modelo multiplica el vector  $x_t$  por la matriz de transición ( $P$ ). Para obtener más intervalos de tiempo, como  $t+k$ , entonces:

$$x_{t+k} = x_t * P^k$$

### **Relación entre variables explicativas y frecuencias de cambio**

Una vez generadas las tasas de transición anual para cada periodo de análisis, el modelo calculó el potencial de transición, dada una condición por cada celda, en función de una condición inicial y las diferentes variables explicativas mediante el teorema de Bayes. Las variables usadas se seleccionaron en el primer paso. Cada variable se transformó en categórica al seleccionarse intervalos de distribución *a priori* (Mas *et al.* 2014; Cuadro 2). Las probabilidades conjuntas, finalmente, se definen como proporciones de probabilidad de que ocurra o no un evento de cambio, en función de la intersección de diferentes variables. Las proporciones son las distribuciones de cada variable; éstas se emplean para calcular el aporte o peso de cada variable al contabilizar la frecuencia de cambios de  $i$  a  $j$  en cada intervalo, lo cual permite elaborar mapas

de potenciales de transición. Este método es conocido como análisis de pesos de evidencia y potenciales de transición (Soares-Filho *et al.* 2004; Pérez-Vega *et al.* 2012).

### **Modelo de autómatas celulares**

Finalmente, el modelo generó simulaciones espaciales utilizando algoritmos de autómatas celulares. En este modelo cada celda de una matriz evoluciona en periodos discretos de tiempo. La transición de un pixel de la clase  $i$  a la  $j$  depende de una serie de reglas de transición. El modelo empleado aquí se desarrolló en el software DINAMICA EGO, que establece dos tipos de reglas de cambio, que pueden ser tanto determinísticas como estocásticas (Almeida *et al.* 2002). Las reglas determinísticas dependen de las tasas de transición calculadas en el primer paso, los aportes de cada variable que modifican el potencial de cambio de un estado  $i$  a  $j$ —expresado por los pesos de evidencia y los valores de cada variable— y, finalmente, el arreglo espacial (vecindario) y la historia de cada pixel (estado en el tiempo  $t - 1$ ). Por otro lado, el conjunto de reglas estocásticas crea y expande parches de cambio de un tipo de cobertura a otro, en función de un análisis espacial previo, en el que se indica el tamaño de parche promedio, la varianza del área de cada parche y la isoforma por cada tipo de transición. La isoforma es índice que toma valores de entre 0 y 1, donde 0 corresponde a una línea recta de pixeles mientras que el valor 1 refiere a un parche con una forma circular perfecta. La expansión de los parches está determinada por la proporción de parches por encima de la media, al suponer que éstos estuvieron sometidos a un proceso de expansión (Soares-Filho *et al.* 2002, 2004).

### **Validación del modelo**

Para validar el modelo de autómatas celulares se utilizaron dos procedimientos. En primer lugar, se calculó el porcentaje de similitud entre una clasificación generada por el modelo de autómatas celulares para el año 2015 y la clasificación supervisada del mismo año mediante un método de comparación difusa, que genera un mapa de diferencias mediante una función de disminución constante, en la que se calcula un índice de similitud que va de 0 a 1 (Soares-Filho *et al.* 2002, 2004, 2013). Por otro lado, se hizo una evaluación mediante el cálculo del área bajo una curva ROC (Relative Operating Characteristic), que se construye al graficar los casos positivos

(sensibilidad) y negativos (especificidad) detectados correctamente al comparar el modelo de simulación con mapas de cambio observado a partir de clasificaciones supervisadas; además, la curva ROC compara el modelo de simulación con como mapas de cambio generados por método de Monte Carlo (modelo nulo) (Pérez-Vega *et al.* 2012; Kolb *et al.* 2013). El área bajo la curva ROC indica la capacidad de predicción del modelo.

## **Análisis cualitativo estructural**

La primera fase del análisis cualitativo comprendió la recolección de información económica y demográfica, así como estadísticas de producción agropecuaria para ambos municipios. Esta información se obtuvo del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) y del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). Los datos obtenidos se usaron para construir el perfil socioeconómico histórico del área de estudio. Así mismo, se usaron fuentes documentales a fin de construir el contexto socioeconómico regional, nacional e internacional, así como detectar algunos de los eventos más relevantes durante el periodo 1985-2015.

Para analizar las perspectivas locales sobre el manejo y cambio en el territorio, así como los principales factores biofísicos, económicos y sociopolíticos que influyen sobre el CUSV en el área de estudio, se hicieron 45 entrevistas semiestructuradas a informantes clave en las comunidades de Nizanda, Aguascalientes la Mata, Gaña, Carrasquedo, La Cueva, Ciudad Ixtepec, El Zapote, Asunción Ixtaltepec, Mazahua y Chivela. Además, se hicieron 13 entrevistas a funcionarios gubernamentales y dos entrevistas a académicos —con más de una década trabajando en el sitio—. Adicionalmente, se desarrollaron dos grupos focales en las comunidades agrarias de Nizanda y Ciudad Ixtepec (Kitzinger 1995).

Las entrevistas y los grupos focales se desarrollaron en cinco visitas de campo que abarcaron el periodo de 2015-2017. Para la selección de los entrevistados se empleó la técnica etnográfica conocida como “*bola de nieve*” (Goodman 1961), que permitió localizar no solamente a los comuneros y ejidatarios, sino también a actores institucionales relevantes para la dinámica territorial en los núcleos agrarios. Las entrevistas se enfocaron en identificar los

principales problemas de la comunidad, los cambios más relevantes, las diferentes políticas públicas aplicadas, la relación entre actores locales y regionales —incluyendo la distribución de costos y beneficios derivados del cambio en el uso del suelo—, las principales actividades y prácticas económicas, y las perspectivas de los productores sobre los procesos que han transformado su uso de las tierras. Por otro lado, las entrevistas a funcionarios se enfocaron en conocer las principales acciones institucionales en la región, la relación entre instituciones, la percepción sobre el sitio de estudio e información detallada acerca de los programas y políticas aplicados en la región. Finalmente, los grupos focales se concentraron en analizar la dinámica territorial de los municipios de estudio —empleando como información suplementaria los mapas temáticos de uso de suelo y vegetación empleados en la sección anterior—, así como los principales cambios de las comunidades en los últimos 35 años.

Todas las entrevistas se transcribieron textualmente y se analizaron en un programa de análisis hermenéutico (Atlas.ti, v. 7.5.4). El programa permite sistematizar textos y catalogarlos de acuerdo con etiquetas prediseñadas en función de los objetivos del análisis (Cuadro 3). Tanto la aplicación de las entrevistas, como la transcripción, se llevaron a cabo con la colaboración de varios miembros del Grupo de Trabajo de Análisis Socioambiental de la Facultad de Ciencias.

Cuadro 3. Etiquetas empleadas para el análisis de entrevistas y grupos focales.

Familia de criqueta	Sub-criqueta
Relaciones entre actores(REL)	Relaciones con efectos en el territorio (RELCUS)
Relaciones entre actores(REL)	Relaciones sin efectos en el territorio (RELNT)
Procesos de cambio (PC)	Expansión agrícola (PCEXAGR)
Procesos de cambio (PC)	Ganaderización (PCGAN)
Procesos de cambio (PC)	Urbanización (PCURB)
Procesos de cambio (PC)	Conservación (PCC)
Procesos de cambio (PC)	Deforestación (PCDEF)
Procesos de cambio (PC)	Otros procesos (PCOPR)
Factores de cambio (F)	Factores espacialmente explícitos (FESP)
Factores de cambio (F)	Factores no espaciales (FNESP)
Factores de cambio (F)	Factores no locales (FEL)

## Resultados

### Características del CUSV en los Municipios de Asunción Ixtaltepec y Ciudad Ixtepec

En 1985, las superficies agrícolas ocupaban alrededor de 15.91 % del área total de ambos municipios, para finalmente ocupar 24.09 % en el año 2015 (Cuadro 4). Desde el inicio del periodo de estudio, la agricultura se perfilaba como la principal actividad económica con impactos en el territorio. Las tierras agrícolas y pecuarias se han caracterizado por pertenecer a ejidatarios y comuneros que trabajan entre 2 y 6 ha, mientras que una minoría alcanzaba hasta 200 ha. Los minifundios de 1985 se distinguían por enfocarse en su mayoría a la producción extensiva, de temporal y de autoconsumo, con policultivos de maíz, frijol y calabaza (en ocasiones melón o sandía), conformando lo que se denomina *milpa tradicional* (Chávez-Servia 2004). Espacialmente, las zonas agropecuarias se concentraron en torno a los principales asentamientos humanos. De manera contrastante al sistema de autoconsumo, en 1985 ya existía un bloque de parcelas de más de 10 ha, destinadas a la producción comercial. Éstas se concentraban en la zona sur de los municipios, donde se localizaba el distrito de riego. Desde entonces, el suelo agrícola se expandió, principalmente en las zonas más bajas y planas del área de estudio, localizadas en el sur y el este de los municipios. Por su parte, la superficie ocupada por pastizales inducidos creció con un patrón menos regular y agrupado que la agricultura (Fig. 7).

En cuanto a la vegetación, la selva baja caducifolia destaca por tener la mayor cobertura desde 1985 hasta el 2015, al ocupar 34.16 % y 28.9 % del área total, respectivamente. Las sabanas, por su parte, fueron el único tipo de vegetación que mostró un aumento de cobertura, de 12.24 % al inicio del estudio a 13.35 % hacia el final del periodo. El método de clasificación no detectó cambios en las áreas cubiertas por sabanas con pinos, las cuales ocuparon 1.25 % del área total durante todo el periodo (Cuadro 4) Finalmente, los asentamientos humanos casi duplicaron su área al pasar de 1.66 % (1985) a 3.1 % (2015). Considerando los diferentes tipos de vegetación, los productores han mostrado una preferencia por establecer parcelas agrícolas en las zonas cubiertas originalmente por selva baja espinosa, seguida de la selva baja caducifolia. Esto

se debe a las condiciones biofísicas que presentan estos sitios que, como se describirá más adelante, son más adecuadas para la agricultura. Por su parte, las zonas de pastizales destinadas a la ganadería se ubicaron, en su mayoría, en áreas cubiertas originalmente por sabanas y selva baja caducifolia.

Cuadro 4. Área total y porcentaje con respecto al área total del sitio de estudio, por tipo de cobertura, en los municipios de Ciudad Ixtepec y Asunción Ixtaltepec, Oaxaca, sur de México.

Tipo de cobertura	1986		1997		2004		2011		2015	
	Área (ha)	(%)								
Selva baja caducifolia	32,516.74	34.16	31,386.75	32.97	30,301.28	31.83	28,939.53	30.4	27,513.41	28.9
Selva baja espinosa	9,578.61	10.06	9,080.07	9.54	8,763.07	9.21	7,376.75	7.75	6,277.06	6.59
Selva mediana subcaducifolia	4,697.63	4.93	4,691.45	4.93	4,662.77	4.9	4,664.49	4.9	4,518.83	4.75
Selva alta subperennifolia	1,722.98	1.81	1,723.44	1.81	1,720.68	1.81	1,716.47	1.8	1,716.47	1.8
Sabanas	11,654.59	12.24	11,630.68	12.22	12,750.42	13.39	12,754.58	13.4	12,711.66	13.35
Sabanas con encinos	7,676.00	8.06	7,252.52	7.62	7,276.57	7.64	7,588.48	7.97	7,313.96	7.68
Sabanas con pinos	1,189.79	1.25	1,189.79	1.25	1,189.79	1.25	1,189.79	1.25	1,189.79	1.25
Vegetación secundaria	5,037.92	5.29	4,656.91	4.89	5,099.08	5.36	3,639.70	3.82	3,341.94	3.51
Agricultura	15,146.08	15.91	17,080.27	17.94	18,095.74	19.01	21,531.22	22.62	22,932.04	24.09
Pastizal inducido	3,159.40	3.32	3,384.05	3.55	1,480.76	1.56	1,932.94	2.03	3,472.31	3.65
Suelo desnudo	1,237.50	1.3	1,316.28	1.38	1,525.19	1.6	1,337.72	1.41	1,256.02	1.32
Asentamientos humanos	1,577.06	1.66	1,802.08	1.89	2,328.93	2.45	2,522.61	2.65	2,950.81	3.1
Total	95,194.29	100	95,194.29	100	95,194.29	100	95,194.29	100	95,194.29	100

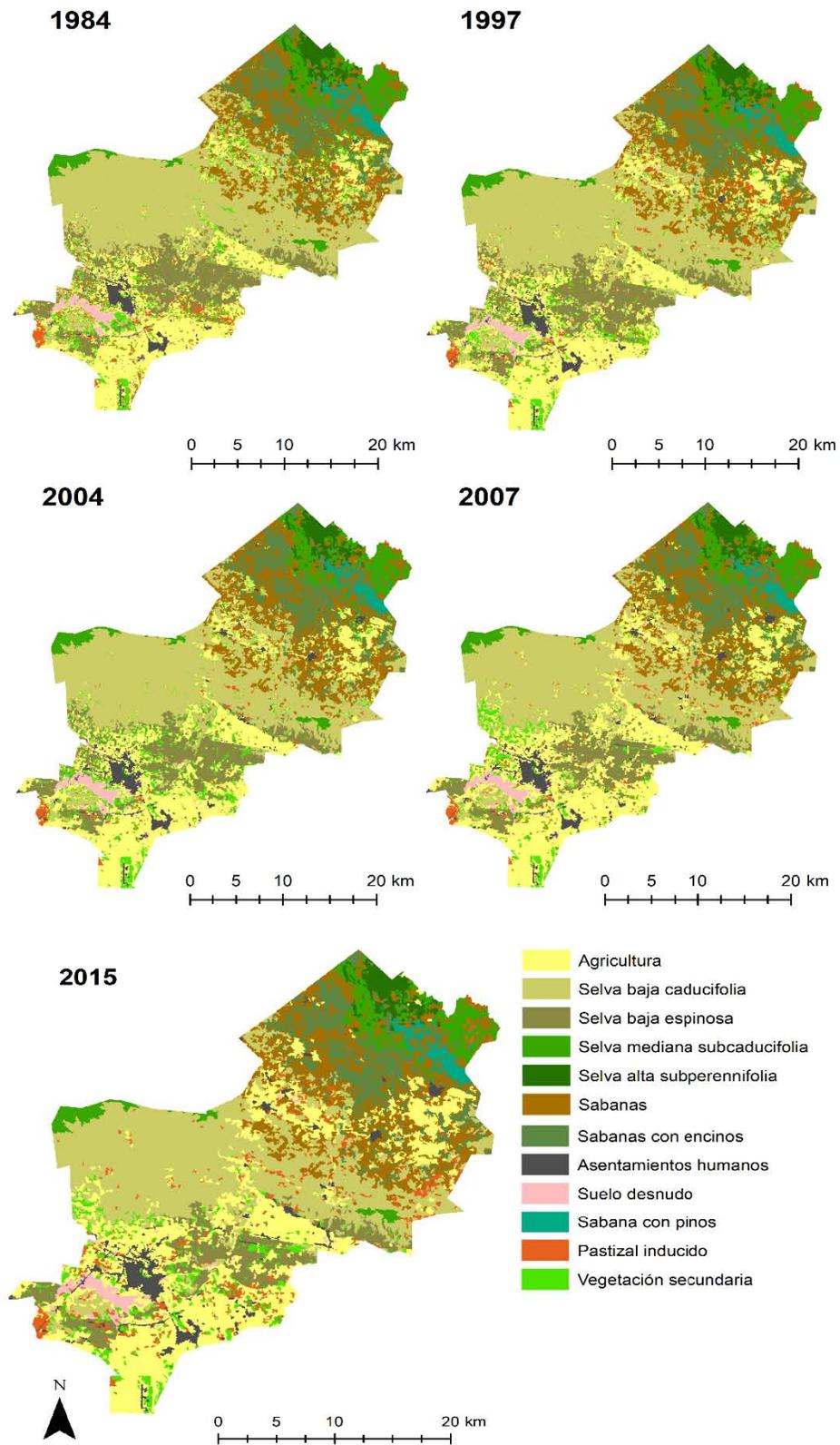


Figura 7. Mapas de cobertura del suelo obtenidos a partir de la clasificación supervisada de imágenes Landsat.

En la Figura 8 se muestran las tasas calculadas para los cuatro tipos de cobertura generales, es decir, vegetación primaria, vegetación secundaria, zonas agrícolas y pecuarias y asentamientos humanos. La transformación de vegetación primaria a secundaria estuvo presente en todos los periodos de análisis; el periodo 2004-2011 mostró la tasa anual más alta (0.5 %). Por otro lado, sólo los periodos de 2004-2011 y 2011-2015 muestran tasas anuales de cambio de vegetación secundaria a primaria con 3.1 % y 2 % de la superficie, respectivamente. En la transformación de zonas cubiertas por vegetación hacia zonas agrícolas y pecuarias, destaca que menos de 1 % de la vegetación primaria se transformó en zonas productivas en todos los periodos. De manera contrastante, alrededor de 10 % de la vegetación secundaria pasó a ser tierras de labor y destaca el periodo de 2011-2015 cuando 11.77 % de la vegetación secundaria era remplazada anualmente por agricultura o pastizales. A pesar de que en todos los periodos existieron zonas cubiertas por vegetación primaria y secundaria que se desmontaron, un análisis detallado muestra que existe un importante recambio entre abandono y reapertura de zonas productivas (Calzada *et al.* 2018, Anexo 1). Ejemplo de esta dinámica es la que se dio en el periodo 1997-2004, cuando tanto los pastizales como las zonas agrícolas presentaron las tasas de abandono más altas (3 %). Posteriormente, en el periodo de 2011 a 2015, la expansión agrícola sobrepasó las tasas de abandono, por lo que las cifras de crecimiento resultan las más altas de todo el periodo de análisis (Fig. 8).

En cuanto al crecimiento registrado en asentamiento humanos, vale la pena resaltar que el periodo de 1997-2004 fue el que registró los valores más altos, cuando 0.2 % de las zonas destinadas a la producción y 0.4 % de la vegetación secundaria fueron remplazadas por asentamientos. Adicionalmente, destaca el periodo de 2004-2011, pues en él no se registraron cambios desde las zonas agrícolas hacia los asentamientos. Debido a que los asentamientos son el tipo de cobertura con el área más reducida, vale la pena analizar su crecimiento con respecto a sí misma. En este sentido, es durante el periodo de análisis 2011-2015 cuando los asentamientos registraron la mayor expansión, pues éstos aumentaron su superficie 50 % (Fig. 8; Cuadro 4).

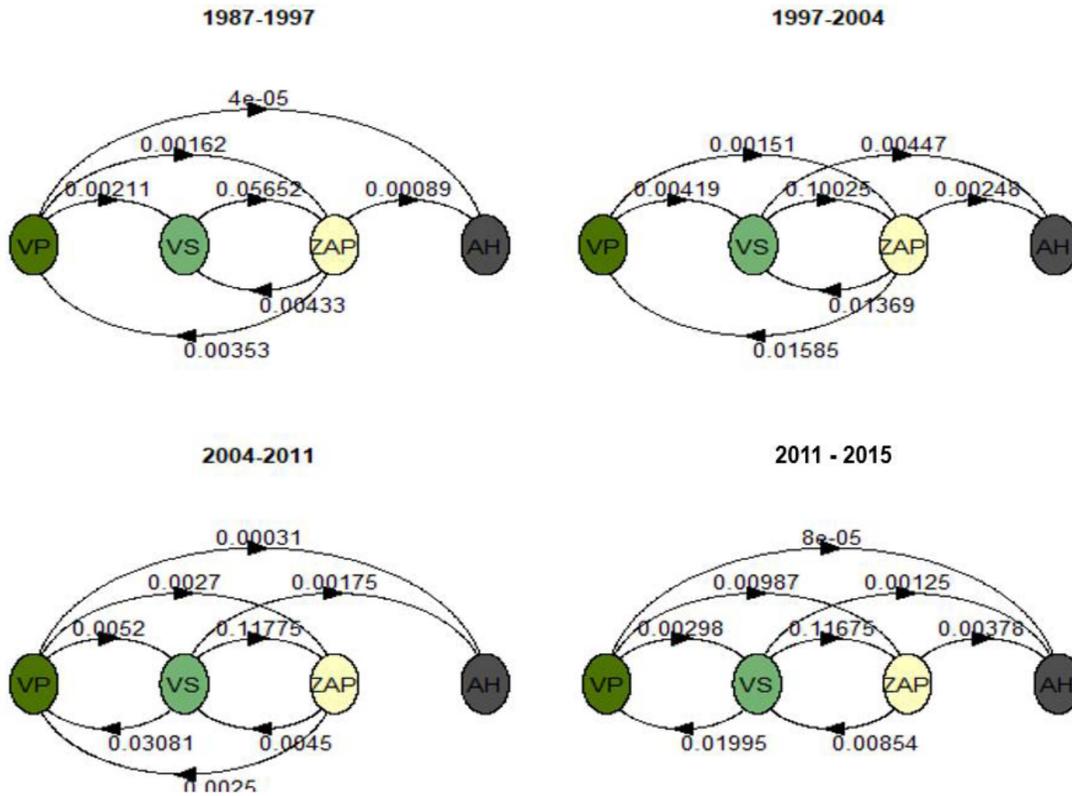


Figura 8. Tasas de transición anual absoluta calculadas durante 4 periodos de análisis considerando cuatro coberturas principales: VP (vegetación primaria), VS (vegetación secundaria), ZAP (zonas agrícolas y pecuarias) y AH (asentamientos humanos). La cifra indica el porcentaje de cobertura del área total transformada.

De manera general, 71 % del territorio no presentó ningún cambio en el suelo, mientras que 19 % cambió una vez y 10 % cambió dos o más veces durante el periodo de análisis. Esta última cifra evidencia la forma en la que se utilizan las áreas productivas de los municipios, pues existen zonas cubiertas originalmente por vegetación que pasan a ser tierras de labor para después ser abandonadas y cubiertas por vegetación de nueva cuenta (Fig. 8).

## Identificación e importancia de factores que regulan el CUSV

### Factores predictivos de cambio

Para la selección de variables se consideraron cinco modelos, todos con un  $\Delta$  BIC menor a dos. Los modelos muestran la relación entre la variable dependiente (número de eventos de cambio

por unidad de producción promedio) y las variables independientes (factores que influyen en el CUSV). El Cuadro 5 muestra los coeficientes obtenidos para cada variable, así como el valor de BIC para cada modelo. El poder explicativo de cada GLMM fue relativamente alto en todos los casos. Los primeros dos modelos mostraron los valores de  $R^2$  más altos, con 0.816 y 0.817, respectivamente. Sin embargo, los valores de ajuste altos, en modelos espacialmente explícitos debe ser interpretado con cautela, debido a la autocorrelación espacial y temporal entre variables; a pesar de que se utilizaron dos variables (cercanía a zonas agropecuarias y a asentamientos humanos) para incluir la correlación espacial, ésta aún puede tener una influencia sobre la  $R^2$  de los modelos.

En los dos modelos con los valores de ajuste más altos se incluyen todas las variables biofísicas consideradas. Las variables económicas y sociodemográficas en ambos modelos mostraron coeficientes similares, aunque se representan diferentes combinaciones de variables. El modelo con el valor de ajuste más alto incluyó variables como el acceso a créditos para la producción, mientras que el segundo mejor modelo excluyó esta variable, pero incluyó la población total por núcleo agrario. Cabe destacar que ambos modelos excluyeron variables como el número de seguros por núcleo agrario, el número de cabezas de ganado en libre pastoreo, la población económicamente activa y la presencia de cooperativas agrarias. Considerando únicamente el modelo con el  $\Delta$  BIC más bajo y el ajuste más alto, casi todas las variables se asociaron negativamente con el conteo de eventos de cambio por unidad de producción promedio, destacan la distancia a agricultura (-1.998), el total de cabezas de ganado por núcleo agrario (-1.974) y la presencia de capacitaciones (-1.921). Por otro lado, el uso de agroquímicos (2.446), el acceso a créditos (1.228) y la organización (designación) intracomunitaria del territorio (0.604) estuvieron correlacionados positivamente con el conteo total de cambios (Cuadro Anexo 4).

## Modelo de simulación espacial del CUSV

### Cálculo de pesos de evidencia

Posterior a la identificación del aporte de cada variable por unidad de producción promedio, se calculó el potencial de que ocurra o no un evento de cambio mediante el método de pesos de evidencia. Un peso positivo indica que la variable es importante para promover el cambio en uso del suelo, mientras que un peso negativo indica que la variable es un factor que disminuye el potencial de cambio. Aunque el modelo contempla todas las transiciones registradas en las 12 clases originales, así como todas las variables, para facilitar la explicación del cambio se muestran aquí únicamente las transiciones en las clases generales de uso de suelo, las cuales reflejan de manera sintética procesos como la expansión agrícola, la transformación de vegetación primaria a secundaria y la urbanización.

Cómo se abordó en la caracterización del CUSV, las clases de uso de suelo generales son Vegetación primaria (VP), Vegetación secundaria (VS), Zonas agrícolas y pecuarias (ZAP), y Asentamientos humanos (AH). De acuerdo con la caracterización de uso de suelo, existen nueve transiciones posibles, las cuales se muestran en la Figura 9. Adicionalmente, aunque el modelo calculó un peso de evidencia (PDE) para cada variable, se consideraron como las más importantes aquellas ubicadas en el primer o último decil de la distribución total de PDE.

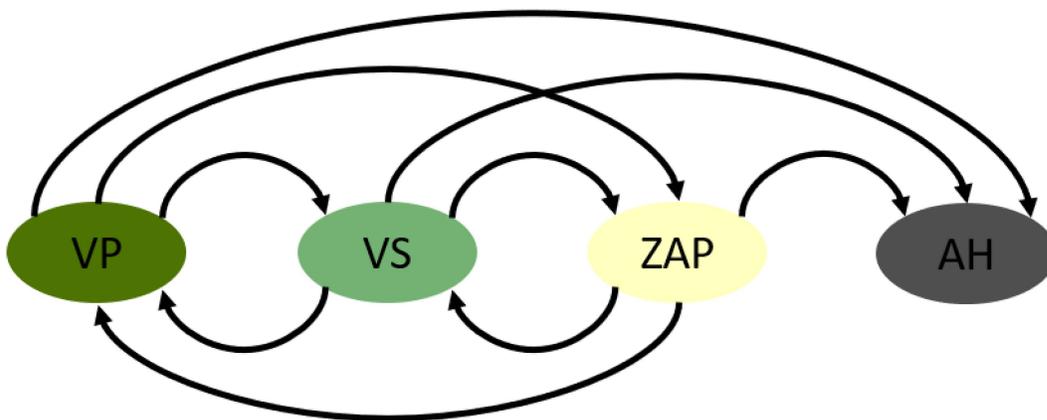


Figura 9. Principales procesos de cambio registrados entre las clases de uso de suelo y vegetación generales. VP (vegetación primaria), VS (vegetación secundaria), ZAP (zonas agrícolas y pecuarias) y AH (asentamientos humanos). Aunque todas las clases presentaron permanencia, el esquema solo muestra las transiciones.

Considerando todo el periodo estudio, para el proceso de expansión urbana, el análisis por PDE mostró que, la transición de VP a AH fue motivada principalmente por el número de créditos y capacitaciones para la producción (20-60 UP), el uso de agroquímicos (161-200 UP) y una distancia a asentamientos menor a los 500 m (Fig. 10-11). Esta misma transición fue desincentivada por la ausencia de capacitación, una distancia mayor a los 1,500 m de coberturas agrícolas o urbanas (Fig. 10 - 11). Para el periodo 2011-2015 únicamente, la distancia de entre 400 y 800 m a aerogeneradores se asoció negativamente con el cambio de VP a AH. La transición VS a AH ocurre principalmente en Chivixhuyo, motivada, además, por el bajo uso de agroquímicos (20-40 UP) y suelos de tipo Cambisol éutrico, es decir, suelos ácidos y poco fértiles (Fig. 10). La última transición considerada como expansión urbana es el cambio de ZAP a AH, la cual ocurrió principalmente en sitios con valores de pendiente mayores a 40°, pertenecientes al ejido de Chivixhuyo (Fig. 10). Únicamente en el periodo 2011-2015, la cercanía a aerogeneradores (0 - 200 m) se perfiló como un variable que motivó la urbanización; por otro lado, esta transición se asoció negativamente con una distancia a caminos de entre 4,500 y 5,000 m, una distancia mayor a 1,000 m de asentamientos y por la presencia de Vertisol crómico, suelo extremadamente duro al estar seco y muy plástico al estar húmedo, por lo que dificultan la agricultura de temporal (Fig. 10 - 11).

La expansión agrícola, por su parte, se dio en las transiciones de VP a ZAP y VS a ZAP. La primera transición se vio motivada en sitios con una evaporación potencial >200 mm (sitios que tienden a ser más bajos y planos), con presencia moderada de créditos (20-60 UP) y distancias menores a 200 m de otras parcelas agrícolas (Fig. 10 - 11); en contraparte, las distancias mayores a 1,000 m de otras zonas productivas fueron el principal factor antagónico (Fig. 10 m,n). Para el año 2015, la ausencia de ADVC y la distancia a aerogeneradores (0-200 m) motivaron la expansión agrícola. En la transición de VS a ZAP, la distancia a asentamientos (> 4,000 m), los suelos de tipo Regosol y el uso de la producción para autoconsumo (venta <20 UP) favorecieron el cambio (Fig. 10 - 11), mientras que la evaporación potencial alta (>200 m) y la pendiente (>40°) lo inhibieron. Para el año 2011-2015 la presencia de ADVC se perfiló como la variable más importante que inhibió la expansión agrícola (Fig. 10 - 11).

La transformación de VP a VS estuvo motivada por la evaporación potencial alta (> 200 mm), el uso moderado de agroquímicos (40-60 UP) y en sitios cercanos a zonas agropecuarias (Fig. 10 -11); la ausencia de ADVC y la distancia a eólicos menor que 200 m se perfilaron como variables importantes que motivan el cambio, aunque sólo fueron evaluadas para el periodo 2011-2015. Como factores que restringieron este cambio destacaron la pertenencia al Ejido de Mena Nizanda, la altitud (> 400 m snm) y la distancia mayor a 1,000 m de zonas productivas (Fig. 10 - 11).

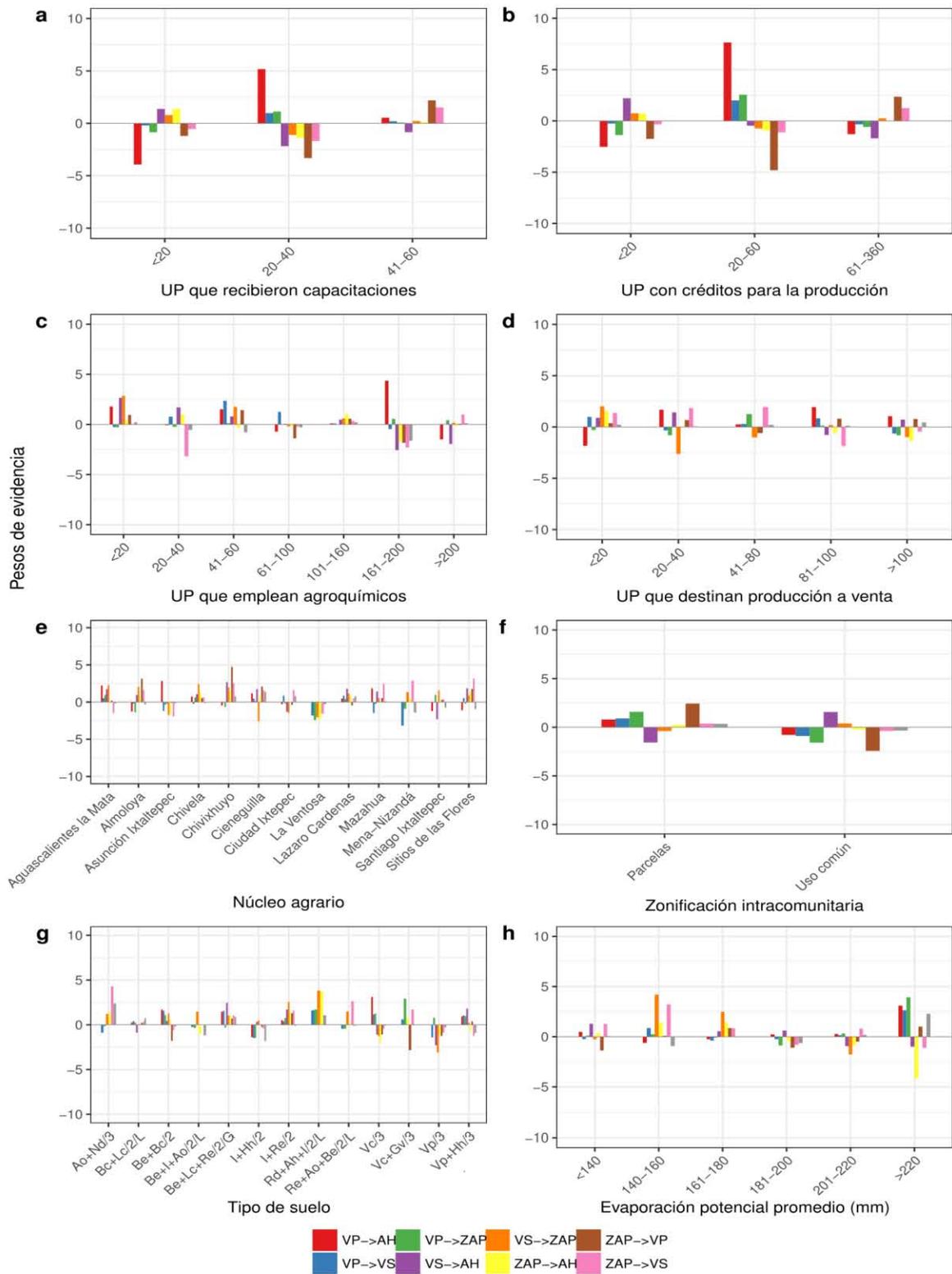


Figura 10. Pesos de evidencia calculados por variable para el periodo 1985-2015. En distintos colores se muestran las transiciones registradas en las clases de cobertura generales, vegetación primaria (VP), vegetación secundaria (VS), zonas agrícolas y pecuarias (ZAP) y asentamientos humanos (AH).

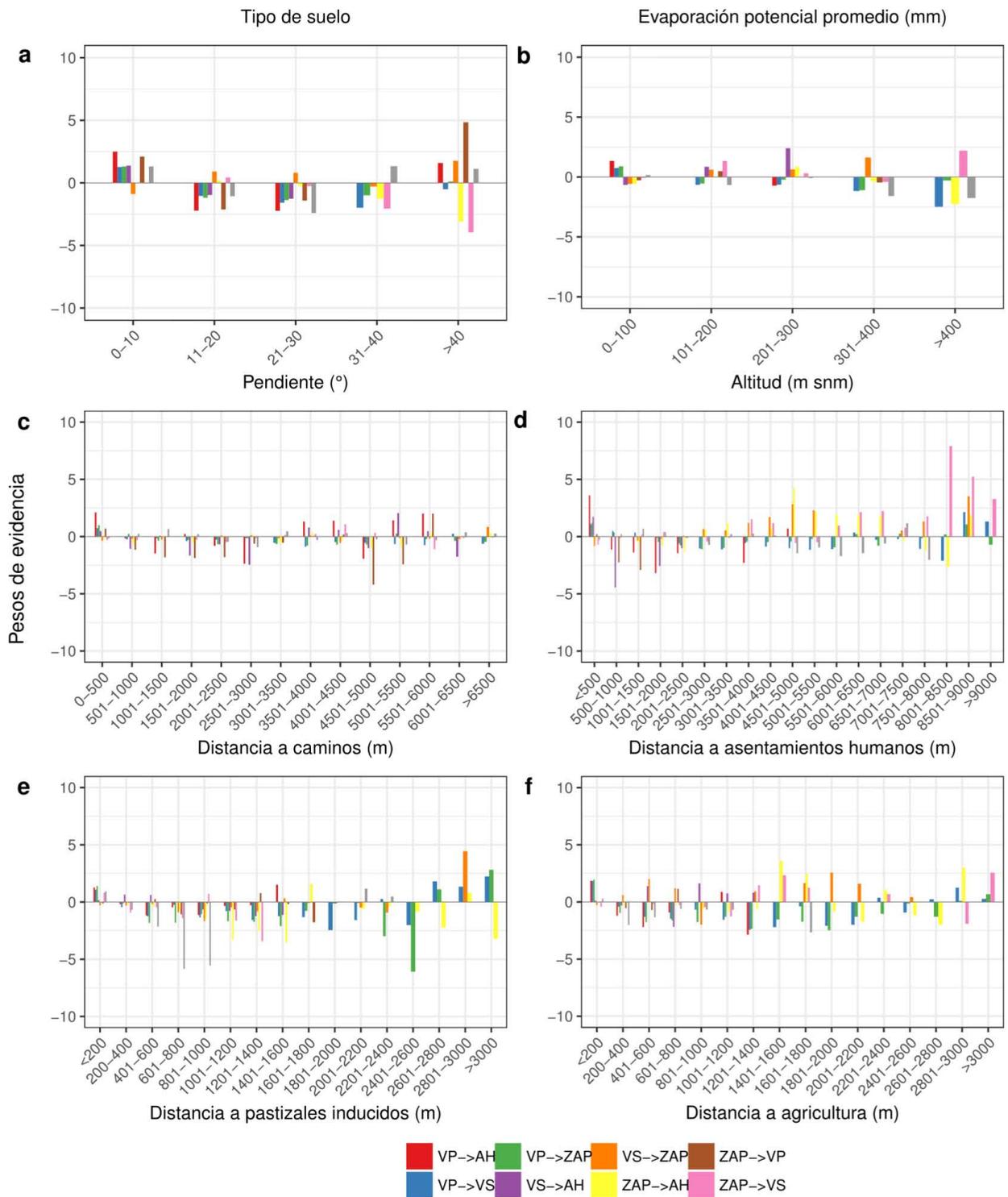


Figura 11. Pesos de evidencia calculados por variable para el periodo 1985-2015. En distintos colores se muestran las transiciones registradas en las clases de cobertura generales, vegetación primaria (VP), vegetación secundaria (VS), zonas agrícolas y pecuarias (ZAP) y asentamientos humanos (AH).

Adicionalmente, los PDE variaron en función del periodo de análisis. Para el periodo 1986-1997, valores de variables como la distancia a zonas productivas (400-3,000 m), el tipo de roca (sedimentaria), la pertenencia a determinados núcleos agrarios (La Ventosa, Almoloya), la zonificación intracomunitaria (uso común), la pendiente (30-40°) y el tipo de suelo (Be+I+Ao/2/L) restringieron el cambio. En contraste, la distancia a asentamientos (8,000-9,000 m), la cercanía a zonas productivas (0-300 m), el acceso a créditos (20-60 UP), el tipo de roca (sedimentaria del cuaternario) y suelo (Rd+Ah+I/2/L, Vc+Gv/3, Bc+Lc/2/L), la pendiente (0-10°), la designación de uso intracomunitario (uso parcelario) y la pertenencia a ciertos núcleos agrarios (Aguascalientes la Mata y Mazahua) influyeron positivamente el cambio.

Para el 1997-2004, los factores más relevantes fueron la distancia a zonas agropecuarias (600-2,000 m), determinados núcleos agrarios (La Ventosa y Mena Nizanda), la presencia de capacitaciones (20-40 UP), tipo de suelo (Vp/3), distancia a ríos perenes y canales de riego (>7,000 m), la temperatura anual promedio (27-28°C) y altitudes de 301-400 m snm como factores negativos. En contraste, como los factores que influyeron positivamente fueron la distancia a zonas productivas (0-3,000 m), la distancia a asentamientos (>8,000 m), el tipo de suelo (Ao+Nd/3, Be+Lc+Re/2/G y Rd+Ah+I/2/L), el núcleo agrario (Chivixhuyo), el tipo de roca (sedimentaria), y la precipitación promedio (100-120 mm).

En el periodo 2004-2011, entre los factores que influyeron negativamente destacaron la distancia a zonas productivas (1000-2600 m), el tipo de suelo (Vp/3), el núcleo agrario (La Ventosa y Asunción Ixtaltepec), la altitud (>400 m snm), el uso de agroquímicos (20-40 UP) y la pendiente (31-40°). Entre los factores que influyen positivamente se encontraron las variables núcleo agrario (Cieneguilla, Chivixhuyo, Sitios de las Flores, Almoloya y Lázaro Cárdenas), tipo de suelo (Rd+Ah+I/2/L, Be+Lc+Re/2/G, Re+Ao+Be/2/L y I+Re/2), la venta de la producción (1-80 UP), el total de cabezas de ganado (<200), la distancia a agricultura (0-300 m) y la precipitación (100-110 mm).

El CUSV en el último periodo (2011-2015) estuvo influido positivamente por el núcleo agrario (Chivela y Aguascalientes la Mata), la ausencia de ADVCA, el tipo de suelo (Rd+Ah+I/2/L,

I+Re/2), la distancia a zonas productivas (0-2,000 m), la temperatura anual promedio (<25°C), la pendiente (0-10°), el número de cabezas de ganado (200-600), el uso de agroquímicos (40-60 UP) y la venta de la producción (20-40 UP). En contraparte, el cambio en el mismo periodo estuvo restringido principalmente por la distancia a zonas productivas (2,001-2,800 m), el tipo de suelo (Vc+Gv/3 y I+Hh/2), núcleo agrario (La Ventosa), la pendiente (20-40°), la presencia de ADVC, la precipitación promedio (110-120 mm) y la evaporación potencial promedio (<140 mm).

Los pesos de evidencia, los valores de las variables independientes y las tasas de transición calculadas fueron usadas para elaborar mapas de potenciales de transición anual, de una clase a otra. Con estos mapas se construyeron simulaciones de cambio de uso de suelo a nivel de pixel, lo cuales se describen en la siguiente sección.

### **Potenciales de transición y simulación de cambios**

Los mapas de simulación muestran la cobertura del suelo anual. Aunque comparados con las clasificaciones supervisadas (Fig. 12 a), las simulaciones sobrestimaron la pérdida de selva baja espinosa, así como el crecimiento de los asentamientos humanos (Fig. 12 b), tanto el análisis de similitud como el cálculo del área bajo la curva para todo el periodo ( $AUC = 0.66$ ) indican que el modelo explica una buena parte de la dinámica de CUSV en comparación con uno generado de manera aleatoria (Fig. 13).

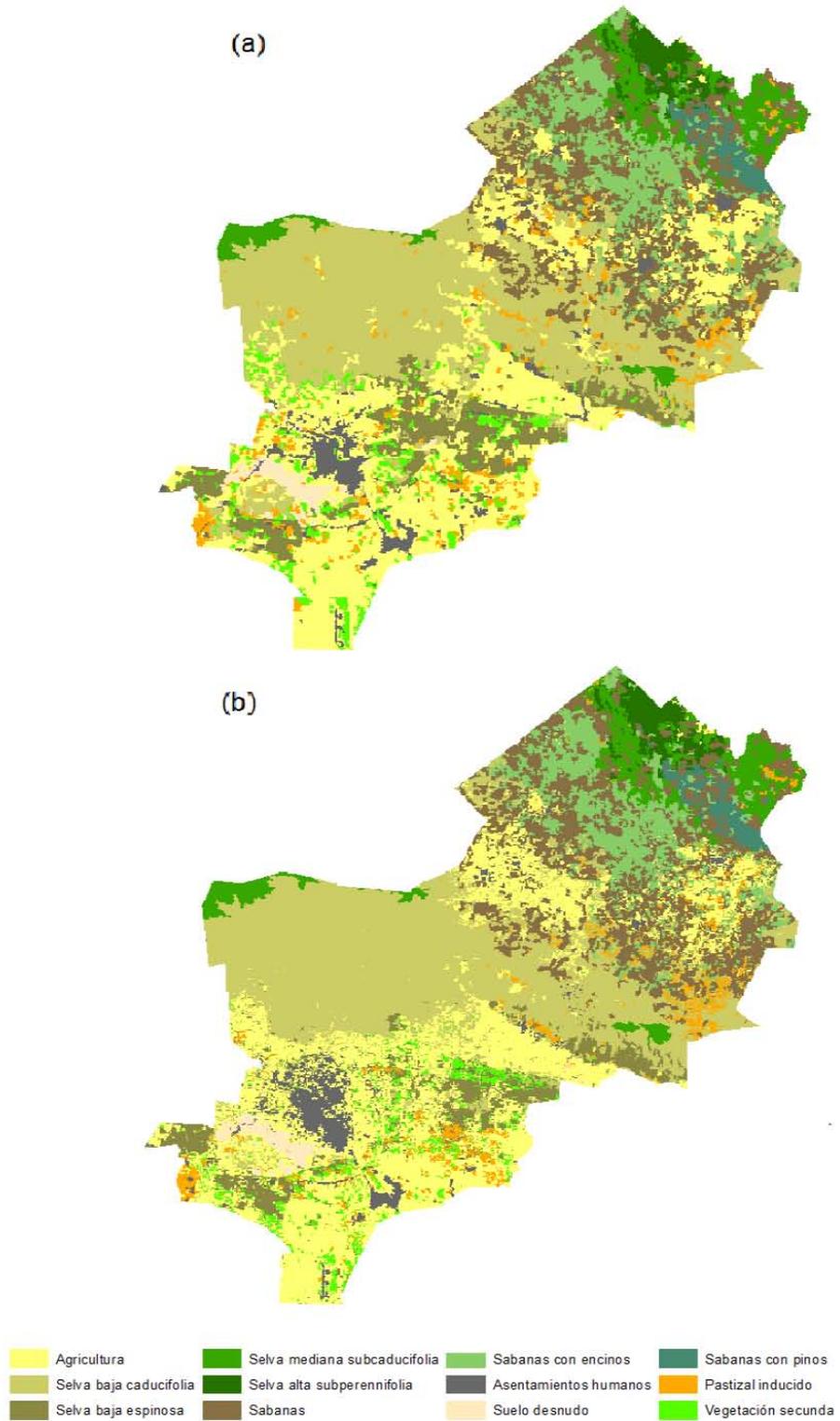


Figura 12. Mapas de cobertura del suelo en los municipios de estudio para el año 2015, a) Clasificación supervisada de imágenes Landsat, b) Simulación generada por el modelo de autómatas celulares.

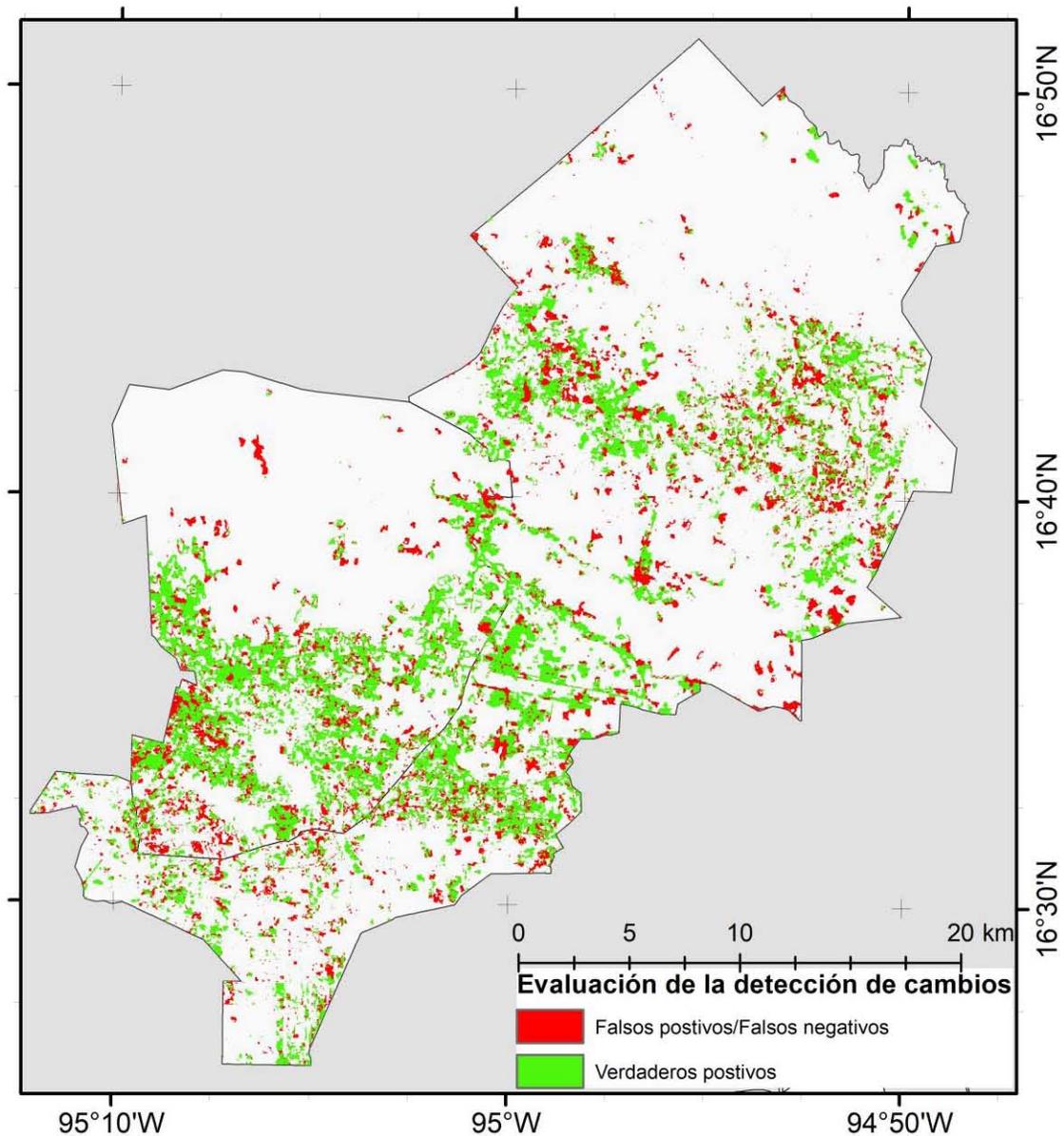


Figura 13. Análisis de similitudes entre clasificaciones supervisadas y escenarios de cambio generados por el algoritmo de autómatas celulares.

En términos espaciales, el modelo de autómatas celulares fue capaz de replicar el proceso de cambio más común (la expansión agrícola) que, como se analizó de manera sintética en la sección de pesos de evidencia, dependió en gran medida de variables como la pendiente y el contagio desde otras zonas destinadas a la producción. Por otro lado, en lo que respecta a la dinámica de cambio en selvas y sabanas, los mapas simulados mostraron que su conservación

dependió, en gran medida, de la designación de sitios como área común o como área natural protegida.

A manera de resumen, en esta sección se mostró cómo, aunque el modelo incorporó tanto variables biofísicas como sociodemográficas y económicas, éstas tienen diferente importancia dependiendo del tipo de transición y periodo que se estudie. En lo que respecta al GLMM, se puede decir que las variables bióticas parecen tener un mayor peso explicativo que las sociodemográficas; no obstante, estas últimas son de gran relevancia en algunos periodos y transiciones. En cuanto al modelo de autómatas celulares, el cálculo de pesos de evidencia mostró que algunas variables como la tenencia de la tierra, la organización intracomunitaria para el uso del suelo y la cercanía a asentamientos humanos o zonas productivas parecen explicar muchas de las transiciones. La generación de mapas de cobertura anual del suelo permitió la evaluación temporal y espacial de manera detalla.

## **Análisis estructural y local del proceso de cambio en el uso del suelo**

### **Contexto histórico de la porción oaxaqueña Istmo de Tehuantepec**

El análisis de los procesos de toma de decisiones sobre el uso del suelo, desde la perspectiva de la ecología política, permite comprender la interacción entre la población y el territorio, considerando fuerzas estructurales a distintas escalas, el contexto histórico del sitio y las relaciones sociales entre actores, aspectos que comúnmente no se pueden considerar en los modelos de CUSV basados en patrones. El istmo de Tehuantepec destaca como un sitio geoestratégico fuertemente influenciado por el contexto internacional. De acuerdo con Rodríguez (2014), la entrada de la región istmeña a la esfera de discusión internacional se suscita a mediados del siglo XIX, con el proceso de maquinización, es decir, la introducción de los sistemas ferroviarios, con la región istmeña como uno de los estandartes de la tecnificación ferroviaria mexicana. Gracias al ferrocarril, los productores de la región adquirieron la capacidad de comercializar sus productos en un área mayor, a la vez que se motivó el intercambio económico entre los asentamientos de los dos municipios de estudio (Hernández *et al.* 2009). Este mayor dinamismo comercial impulsó

el crecimiento y el desarrollo de numerosas actividades económicas, entre ellas el crecimiento agrícola y la ganaderización. Sin embargo, también generó procesos de especulación de tierras cercanas a las vías y favoreció la consolidación de grupos zapotecos, al posicionarlos como actores clave del comercio regional (Coronado Malagón 2009). Es por estas razones, que los productores de la región reconocen la importancia del ferrocarril en sus actividades hasta 1994, año en el que este sistema de transporte se reformó y dejó de operar parcialmente en la región.

De modo parecido a la industria ferroviaria, la industria petroquímica ha jugado un papel muy importante en la región desde 1974, año en que inició la construcción de la refinería de Salina Cruz. Diez años después, el “*Proyecto Petrolero del Pacífico*” contempló la realización de seis proyectos en el Istmo de Tehuantepec, lo que generó una red de ductos de crudo, destilados, amoníaco y gas natural (Rodríguez 2014). Ya en la década de 1990, PEMEX (Petróleos Mexicanos) se perfilaba como la tercera industria petroquímica más importante del mundo. Esto generó un clima de inversión y crecimiento en la región y en el país. Ejemplos claros de este proceso, son la puesta en marcha de una planta isomerizadora en Salina Cruz en 1995 y la expansión de la refinería “*Antonio Dovalí*” en 1997 (Rodríguez 2014). Este crecimiento colocó a la región en un punto estratégico para satisfacer la demanda energética, no sólo para el norte de México, sino también para distintas regiones del mundo, entre las que destacaba Japón como uno de los principales compradores de crudo y petroquímicos mexicanos de aquella época (Rodríguez 2014).

Los efectos territoriales de los proyectos petroleros y ferroviarios en Ciudad Ixtepec y Asunción Ixtaltepec fueron tanto directos como indirectos. Por un lado, la presencia de ambas industrias dotó a la región de fuentes de empleo asalariado, lo que se tradujo en que los productores agropecuarios de varios núcleos agrarios —entre los que destaca Mena Nizanda— tuvieron la posibilidad de acceder a una fuente alterna de ingreso. Esto, a su vez, catalizó dos posibles escenarios; en algunos casos, la fuente extra de ingresos permitió desarrollar y expandir, tanto actividades agrícolas como ganaderas, pues éstas eran subvencionadas por el ingreso corriente de los productores contratados por Ferrocarriles Nacionales de México o PEMEX. En

contraste, existía la posibilidad de un efecto de retroalimentación negativa, es decir, una menor expansión agrícola, debido a que las presiones sobre el territorio eran menores, pues había menor dependencia de la agricultura y la ganadería debido a la migración de la población económicamente activa más joven hacia plantas petroquímicas, plataformas petroleras o áreas con oferta de empleo asalariado fuera del sitio de estudio. Por otro lado, algunos productores —principalmente de la región sur de los municipios de estudio— mencionan que las refinerías acapararon el agua, lo que impidió el desarrollo de la agricultura de riego durante la década de 1990, que después desembocó en el abandono de muchos de los canales de riego. Por otro lado, los proyectos petroquímicos tuvieron efectos directos sobre el cambio de uso de suelo; por ejemplo, existen tres líneas de oleoductos, para las cuales se desmontaron los trayectos por los que se construyeron; esto, además, dotó de un pago a los productores y núcleos agrarios, dueños de parcelas por las que dichas líneas atraviesan, motivándolos a desmontar pues la indemnización es mayor en parcelas agrícolas que en aquellos sitios con vegetación (destinado o no a libre pastoreo). El papel que jugaron estos procesos es percibido por los habitantes de la región:

“Aquí hay un chingo de jubilados de Ferrocarriles Nacionales de México.” [Ejidatario, Ejido Mena Nizanda]

“Ahorita como no necesitamos apoyo [gubernamental o remesas de familiares], soy jubilado de Pemex, pues de ahí este ...la lana.” [Ejidatario, Ejido Mena Nizanda]

“[El dinero por los ductos] te toca a ti nada más, o sea no le tienen que dar nada al ejido... Pemex trabaja, como tiene que entrar, ya sabe que el camino es del ejido, entonces él tiene que aportar una lana para la comunidad cuando hace los trabajos.” [Comunero, Comunidad Agraria de Ciudad Ixtepec]

“La bronca está en que ahorita a dónde va a pasar la línea de transmisión; un ejemplo, va a pasar en mi terreno y no soy comunero, o aunque yo fuera comunero pero apenas cerqué ese terreno y ya ahorita ya viene la línea de transmisión, me tengo que oponer —sí, o me van a pagar, o no pasan — y ya a ver con el comisariado, a ver pásenme ahí, porque ahí va y punto, y ahí es donde se meten los conflictos. [menciona a un comunero] no quiere que pase la línea en su terreno. Porque le dijeron que era un terreno de potrero, el que está ahí por el aguaje. Le dijeron que no le iban a pagar nada porque es un terreno que es potrero; aunque seas comunero ahí, si es terreno de siembras sí, que vean [PEMEX Y CFE] que sí lo estás

trabajando cada día... Él nunca siembra [...]. Y nosotros le metimos máquina, no sé si fueron 2-3 hectáreas, no sé exactamente cuánto lo que sembró.” [Comunero, Comunidad Agraria de Ciudad Ixtepecc]

Otro proceso regional relevante que jugó un papel importante en el uso del suelo fue la expansión de la infraestructura carretera. Ésta estuvo fuertemente influenciada por el proyecto de desarrollo destinado a puertos petroleros, industriales, pesqueros o turísticos, puestos en marcha durante la década de 1990. Este megaproyecto contemplaba programas de fomento comercial (estatal y federal) en 40 % de los municipios istmeños (Rodríguez 2014). Cabe resaltar que a pesar de que 60 % de los fondos se destinaron a la industria agropecuaria, éstos se aplicaron en su mayoría en la porción veracruzana del Istmo. Por su parte, en el istmo oaxaqueño, el proyecto motivó las actividades fabriles y extractivas como maquiladoras, ensambladoras, minas y cementeras (Léonard 2009; Prévôt-Schapira 2009). En los municipios de estudio destaca el papel de la minería no metálica, como los proyectos de extracción de caliza en el ejido Mazahua en Asunción Ixtaltepec y la cementera de Barrio de la Soledad (municipio colindante al norte del área de estudio). La literatura señala que los proyectos mineros (tanto metálicos como no metálicos) se vieron motivados no sólo por el fomento federal y estatal, sino también por la modificación a la Ley Agraria promulgada en 1992, como parte del conjunto de transformaciones asociadas a la entrada de México al Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN). Esta modificación de ley permitía a los ejidos autorizar proyectos extractivos (Appendini *et al.* 1993).

El gobierno mexicano, además, utilizó esta ley para impulsar de manera directa un modelo agrícola que significó la reconfiguración radical de toda la estructura de la industria del sector primario, en favor de un sistema de producción agroindustrial en grandes extensiones, operando bajo un esquema de libre mercado y con apertura comercial internacional. Para reforzar este esquema, en 1992 se reformó el Artículo 27 constitucional, modificando así el esquema de tenencia ejidal al permitir la venta/renta de tierras, en un intento por aumentar el tamaño de las parcelas y la desintegración de la propiedad social. Esta cruzada fue especialmente relevante para la dinámica territorial de ejidos y comunidades, pues cerca de 50 % de las tierras productivas

mexicanas se halla bajo algún tipo de propiedad social (Appendini *et al.* 1993; Braña Varela y Martínez Cruz 2005; Merino-Pérez y Segura-Warnholtz 2007).

Hasta la década de 1980, las políticas agropecuarias en México se concentraban en la autosuficiencia, pagando a los productores hasta el doble del precio internacional por sus productos y, simultáneamente, subsidiando insumos básicos como fertilizantes y sistemas de irrigación (Appendini *et al.* 1993). En la década de 1980 y 1990 gran parte de los productores de los municipios de estudio poseían seguros y subsidios para la producción, distribución y comercialización de sus productos. En términos generales, la apertura comercial ha dejado expuestos a los productores ante las fluctuaciones del mercado principalmente en los precios de maíz y sorgo rojo o blanco, obligándolos a aumentar la superficie sembrada, al uso de agroquímicos, a la tecnificación y al monocultivo para obtener la mejor relación insumos-rendimiento-ganancia.

El sector agropecuario sufrió una reestructuración durante 1994, con el fin de generar un esquema de transición a través de la aplicación del programa productivo PROCAMPO, que actualmente es el de mayor extensión a nivel nacional. El objetivo inicial de este programa era ayudar a los agricultores a transitar de la producción protegida a la de mercado abierto en un periodo de 15 años. El programa otorga pagos fijos por hectárea, con la esperanza de que los agricultores usen este dinero para modernizar su producción. De esta manera, el gobierno esperaba hacer una transición del autoconsumo hacia las exportaciones. Empero, dada la polarización del campo en México y el monto de las políticas como PROCAMPO, pocos productores han logrado la transición a la agroindustria de exportación, por lo que PROCAMPO ha funcionado como una asistencia social más, que permite la subsistencia campesina pero no la capitalización o la construcción de capacidades. En los municipios de estudio, los productores identifican claramente este programa, pues es el de mayor presencia en el sitio (es incluso el único reconocido por algunos de los productores). El programa ha tenido importantes efectos en la toma de decisiones sobre el manejo de las tierras, pues de acuerdo con varios entrevistados, ha

obligado a los agricultores a sembrar aun a pesar de preverse altas probabilidades de pérdida de las cosechas, como producto de sequías u otros factores.

“El problema para los campesinos es que, por acá, esta zona, llueve muy poquito y muchos años se pierde la cosecha por sequía, [...]. Nosotros estamos obligados a sembrar porque nos dan ese apoyo de PROCAMPO.” [Ejidatario, Ejido Mcna Nizanda]

“...la mayoría [de los productores] prefiere el maíz y el sorgo, [...]. Este año fueron programadas 270 hectáreas, que no es mucho comparado con la superficie total. En otros años hemos llegado a sembrar hasta 1000 hectáreas, pero el problema que se ha venido es que el precio por tonelada, como se rige por la bolsa de valores, ha andado entre los 1500 y 3300. ¡Claro!, ahorita que no hay sorgo, sube hasta 3800-4000 pesos la tonelada, pero en cuanto empieza a salir la producción se va hasta 2500-3000 pesos, entonces necesitamos sacar arriba de 3 toneladas para que sea redituario. Y la ventaja también que tiene el sorgo, independientemente de la producción de grano, es que la cantidad de forraje es mayor que la que da el maíz, la desventaja es, que si siembras sorgo rojo, que le llaman, es amargo, y el sorgo blanco es dulce, entonces la mayoría de los que son ganaderos vienen a sembrar sorgo blanco, aunque produzca menos, para poder alimentar al ganado.” [Comunero, Comunidad Agraria de Ciudad Ixtepec]

Ciertamente el TLCAN no fue el único tratado que tuvo relevancia en el sitio. La cooperación Asia-Pacífico constituía en sí mismo el 55 % de ingreso económico mundial en el año 1996. Además, de acuerdo con la literatura, se atribuye a este tratado internacional entre 3 y 5 % del crecimiento económico del istmo oaxaqueño para el año 1997 (Rodríguez 2014). Estos tratados internacionales se tradujeron en el crecimiento de los principales núcleos urbanos producto de la migración motivada por la apertura de empleos en el sector secundario y, con ello, el aumento simultáneo de la demanda por recursos y energía, así como el acceso a fuentes de ingreso y mercados diversos (Rodríguez 2014). Como parte de la inserción de México en el comercio mundial, el istmo oaxaqueño se perfiló como un corredor económico estratégico para México. Por estas razones el Istmo ha transitado como un sitio estratégico de un proyecto a otro, entre los que destacan el Plan Puebla-Panamá, el Corredor Mesoamericano y las Zonas Económicas Especiales.

Esta creciente oleada de proyectos de desarrollo, aunada a la emergencia internacional por la búsqueda de fuentes de energía sustentables y las condiciones ambientales particulares de la región, motivó uno de los procesos socioeconómicos recientes más notables en los municipios de estudio. Se trata de la puesta en marcha de las centrales eoloelectricas en la región istmeña (Jara Castillo 2012; Chávez 2014; Juárez-Hernández y León 2014; Martínez González y Gómez Suárez 2017). La primera central eoloelectrica del Istmo de Tehuantepec —y de México— se estableció en el año de 1994 en el ejido la Venta. Aunque la mayor parte de este núcleo agrario se encuentra en el municipio de Juchitán de Zaragoza, una pequeña parte de éste se localiza en Asunción Ixtaltepec (Juárez-Hernández y León 2014). Este proyecto y todos los establecidos posteriormente fueron licitados por la Comisión Federal de Electricidad bajo el esquema de obra pública financiada, hecho por el cual la mayor parte de la inversión proviene de fuentes privadas (Chávez 2014). Casi una década después, el estado de Oaxaca impulsó el desarrollo del megaproyecto<sup>9</sup> “Corredor Eólico del Istmo de Tehuantepec”, el cual se concibió dentro de un ambicioso esfuerzo para hacer del Istmo de Tehuantepec una ruta comercial y de comunicación interoceánica (Juárez-Hernández y León 2014; Martínez González y Gómez Suárez 2017).

De acuerdo con la mayoría de los habitantes de la región entrevistados, la entrada de los parques eólicos en los municipios de estudio —principalmente en el ejido Aguascalientes la Mata (municipio Asunción Ixtaltepec)— ha resultado ser un elemento benéfico para la economía de un parte de la población. De manera contrastante con el discurso dominante de la literatura publicada en torno a los procesos sociales relacionados con los aerogeneradores (Jara Castillo 2012; Chávez 2014; Juárez-Hernández y León 2014; Martínez González y Gómez Suárez 2017), muchos de los productores del sitio consideran esta iniciativa como una oportunidad única de

---

<sup>9</sup> Existen diferentes maneras para clasificar a un megaproyecto como tal, cuantitativamente se considera un megaproyecto a aquellos en los que el costo de inversión supera los US\$ 1 000 millones. Además, existen indicadores cualitativos para clasificar a los megaproyectos y se basan en el fuerte impacto directo o indirecto sobre la comunidad, el medio ambiente, el territorio, la organización institucional y/o la economía (Flyvbjerg *et al.* 2003; Cortes Forero *et al.* 2017). Para un análisis exhaustivo de las distintas definiciones del concepto megaproyecto, así como los indicadores específicos que éstas engloban consúltense las fuentes aquí citadas.

crecimiento y llegan, incluso, a considerar a los aerogeneradores como una “bendición” o equivalente a sacarse la “lotería”. Esto refleja que, en la región hay una mayor heterogeneidad de respuestas sociales a los aerogeneradores que las reportadas en la literatura, pues se trata de un fenómeno socioeconómico y político complejo, por lo que genera procesos y respuestas sociales diversas.

De manera similar a lo cambios generados por el paso de oleoductos, los aerogeneradores tienen efectos, tanto directos como indirectos sobre el cambio de uso de suelo, principalmente sobre el proceso de expansión agrícola y la urbanización. En primera instancia, la entrada de aerogeneradores implica necesariamente la apertura de caminos y talleres para su mantenimiento, lo que conlleva procesos de urbanización que ocurren en sitios que antes eran ocupados por agricultura, vegetación secundaria o selva baja espinosa. De manera indirecta, por otro lado, los aerogeneradores se traducen en una diversidad de procesos, ya que brindan infraestructura e ingresos a las comunidades en las que se desarrollan los parques eólicos. Como es el caso de los ejidos de Aguascalientes la Mata y La Ventosa (municipio Asunción Ixtaltepec). Además, las negociaciones entre los ejidatarios en torno a las contrapartidas otorgadas por las empresas eólicas han creado conceptos como el “*derecho de viento*”, el cual es un pago que se asigna a todos los ejidatarios, independientemente de que tengan o no una parcela en la que se instale un aerogenerador, siempre y cuando sus parcelas se encuentren dentro del polígono licitado para el proyecto electroeólico.

“Están [presentes] las empresas que están detrás de los eólicos. [Además del pago a cada ejidatario han dado apoyo a la comunidad], han pavimentado calles, han hecho, por ejemplo, un centro deportivo allá, y aquí en la agencia municipal, también sí. En la escuela también han ayudado para una construcción de una biblioteca para los niños, que tiene muchas computadoras. Bueno, ya entrando en detalle, hay muchas galeras en la primaria, en el kínder, aquí en la agencia municipal, allá hay un... Cómo se llama... Un tipo, fútbol de salón recreativo, ¿Cómo le llaman? Pues [estamos felices] porque ya se ha hecho trabajo para todos, ¿no? Lo que es calle y lo que ya dijimos.” [Ejidatario, Ejido Aguascalientes la Mata]

“Bueno, esa es la nueva, pues. Es una salvación [los aerogeneradores]. Pues aquí es un cambio de 360 grados en la Mata, gracias a Dios y a todos los que lo hicieron. Pues gracias a Dios,

todo lo que hicieron, es bueno. Porque hubo mucho apoyo, pues, nosotros apoyamos a que se realizara ese proyecto aquí en la Mata y pues es la vida del 99.9% de la Mata.” [Ejidatario, Ejido Aguascalientes la Mata]

“Ahorita los ventiladores [acrogeneradores]. Es el apoyo grande que tenemos, es una jubilación por 30 años que muchos de nosotros ya no vamos a ver y que todos deberían comprendernos, de que eso es una abertura de vida para nosotros porque, pues aquí el 90%, no, casi el 100% de la gente, pues no está jubilado. Ellos no tienen otra entrada más que eso. Y eso fue lo que vino a enriquecer aquí en la Mata, los ventiladores. En este momento ya todo mundo, cuando escucha que va a haber un proyecto, todo mundo se pone alegre, es ahorita la cuestión, el dinero. Anteriormente no era así, porque la gente pensaba de otro modo antes. De que no permitían que ni una sola piedra que estuviera en su parcela, pero ahorita ya no, ya todo cambió, lo que es el dinero y pues todo mundo quiere dinero.” [Ejidatario, Ejido Aguascalientes la Mata]

“Yo tengo todo, tengo derecho de viento y tengo el ventilador. O sea, estando en el polígono, aquí se dividió el pueblo, se dividió en la primera etapa que es allá y luego aquí hay una segunda etapa y aquí hay una tercera etapa, es el pueblo, ¿no? La compañía que entra a esa etapa está pagando hasta el último tramo de ese terreno, aunque no te toque el ventilador, el que está en este polígono, igual que en este polígono [y se paga derecho de viento], nada más que aquí hay dos. Está el primero y el tercero, este es el que está en proceso, pero les está pagando una cantidad de dinero por derecho de viento.” [Ejidatario, Ejido Aguascalientes la Mata]

El capital proveniente de los aerogeneradores otorgado a los habitantes de los municipios de estudio tiene, a su vez, diferentes efectos. Uno de los resultados sobre el sector agrícola o pecuario es el abandono de las parcelas debido a que la indemnización del aerogenerador actúa como una suerte de pensión. Para otro sector de productores, el pago compensatorio ha permitido sufragar la mecanización, intensificación y expansión agrícola, principalmente en el sector dedicado a la siembra de sorgo. Fuera del sector primario, los aerogeneradores han abierto la posibilidad de trabajo remunerado sin abandonar el sitio, reduciendo así la migración, principalmente en el sector más joven, aunque muchos aún se trasladan a las plataformas petroleras o migran hacia Estados Unidos en busca de trabajo. Finalmente, a pesar de que, —en apariencia general— la población ha encontrado la manera de distribuir un poco más equitativamente los beneficios de

la industria electroeólica, también es cierto que su operación se ha articulado en la región a través de prácticas clientelares, al condicionarse el acceso al trabajo dentro de la empresa, pagos de “*derecho de viento*”, acceso a programas de gobierno —sobre todo enfocados a la agricultura— a los sectores más vulnerables del ejido Aguascalientes la Mata.

“Sí pagan bien, algunos tienen tres ventiladores en el terreno y les pagan 50 mil pesos al mes. Ya para qué vas a trabajar [la tierra] si ya con eso tienes.” [Ejidatario, Ejido Mena Nizanda]

“Allá en la Mata hay más fuentes de trabajo, como ahí están los aerogeneradores [los jóvenes trabajan como mano de obra]. Pues [los ejidatarios beneficiados todavía] cultivan, pero dicen que con lo mismo que como están los ventiladores ya no se preocupan [de invertir y perder sus cosechas por sequía].” [Ejidatario, Ejido la Cueva]

—“En el municipio se ha manejado de que si estás muy a la izquierda [políticamente hablando] y no apoyas porque no te dejas llevar por cómo se están trabajando te pueden brincar [...], ya no trabajas. Ya no trabajas en la empresa, ya no te dejan trabajar. A mí me sucedió eso en un principio, o sea que yo no me quería alinear, quería que las cosas fueran bien, pero ya ves que un sistema o un gobierno no te absorbe. No puedes con una maquinaria... tú tienes que adaptarte a como viene esto para que tú puedas trabajar, porque si no, simplemente te quedas.” [Ejidatario, Ejido Aguascalientes la Mata]

Además, las decisiones en torno a los aerogeneradores dejaron de desarrollarse en el espacio tradicional de toma de decisiones, es decir, la Asamblea General, lo que trastoca los mecanismos locales de participación y control del territorio:

“Hay cosas que no les gustan [respecto a los aerogeneradores], por ejemplo... nosotros llegamos a saber que se va a hacer esto, que se va a hacer aquello, pero en realidad no se dice en una Asamblea, no se dice en una Asamblea que hay un proyecto para esto y se va a hacer esto y esto, entonces, hay gente que está en contra porque ellos en realidad quieren saber el monto de un trabajo, de un proyecto y entonces eso no se sabe.” [Ejidatario, Ejido La Mata]

Es posible dilucidar la existencia de numerosos factores relevantes para el cambio de uso de suelo que, al operar a escalas regionales, nacionales o globales, pudieran parecer inconexos o con efectos poco conspicuos a escala local; sin embargo, éstos llegan a desencadenar diversas presiones, tanto directas como indirectas, sobre las distintas actividades económicas y, por supuesto, sobre la dinámica de cambio de uso de suelo. El análisis de entrevistas, grupos focales y literatura permitió

seleccionar aquellos factores con las consecuencias más claras. Es posible englobar a los factores antes mencionados en dos categorías, que además han sido descritas como determinantes centrales para el cambio de uso de suelo por la literatura: (1) factores relacionados con esquemas macroeconómicos, en los que destacan los acuerdos internacionales de comercio, los cambios en el modelo económico nacional, el papel de empresas paraestatales y transnacionales, y las fluctuaciones del mercado agrícola, y (2) factores relacionados con cambios políticos, como la reconfiguración de la propiedad social a raíz del TLCAN y la implementación de PROCAMPO a nivel nacional (Veldkamp y Lambin 2001).

### **Percepción de factores y procesos de cambio a escala local**

De manera local, los ejidatarios y comuneros identifican como factores más frecuentes aquellos que tienen una expresión espacial explícita, es decir, que pueden ser cartografiados. Algunos artículos como el publicado por Veldkamp y Lambin (2001), mencionan que los factores más importantes a escala local que determinan el cambio de uso de suelo, sobre todo en zonas rurales, son los rasgos topográficos y las variables agroclimáticas (e.g. temperatura y precipitación). En concordancia con esto, los ejidatarios expresaron que los principales factores que impiden la expansión agrícola, a pesar de tener un título de posesión parcelario, son la pendiente y la falta de agua, relacionada con las sequías del último lustro. Otros determinantes espaciales para la expansión agrícola, el establecimiento de potreros y la urbanización, de acuerdo con los productores de la región, son la cercanía a caminos y a ríos o canales de riego, la distribución poblacional, el tipo de suelo. Además de los rasgos biofísicos, tanto en las entrevistas como en los grupos focales, se mencionan una serie de factores locales relevantes para procesos como la expansión agrícola, la conservación, la ganaderización y la urbanización en distintos periodos entre los años 1986 y 2015, los cuales se resumen en la línea de tiempo mostrada en la Figura 14.

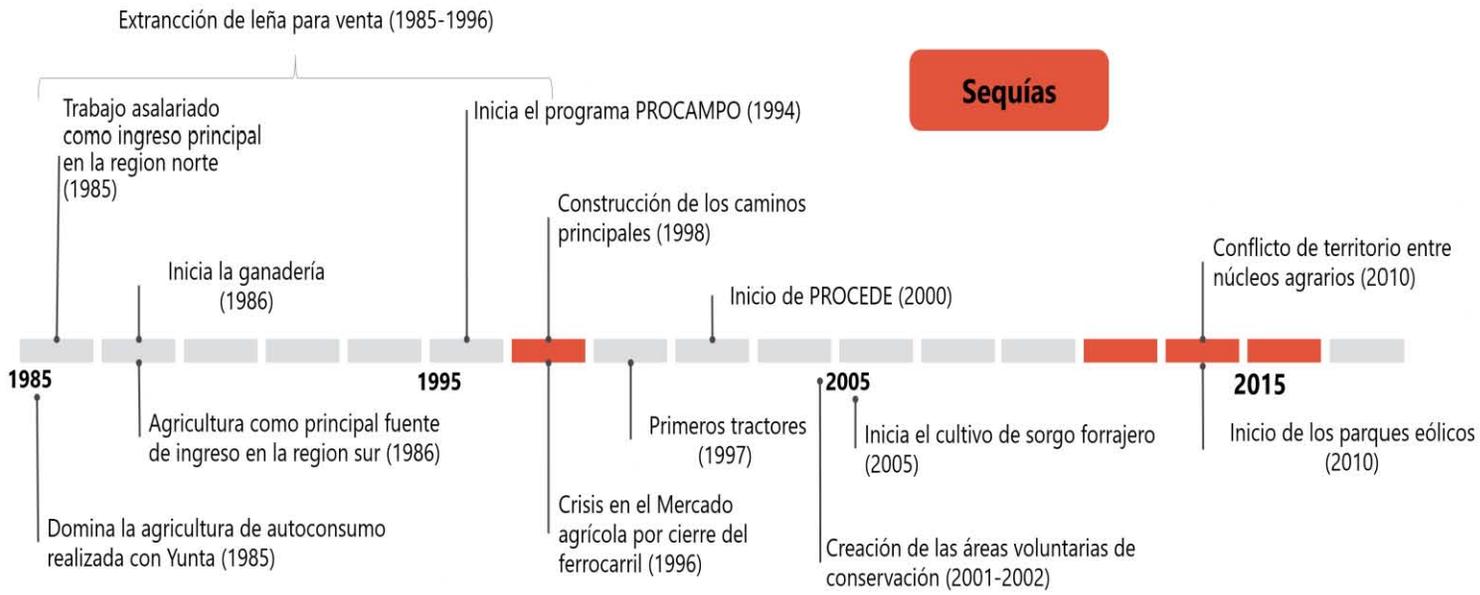


Figura 14. Línea de tiempo de factores que influyen en el cambio de uso de suelo y vegetación detectados por los entrevistados

Específicamente en el sector agrícola, un cambio importante registrado por los productores fue la transición de cultivos de subsistencia a comerciales y con ello la pérdida de las prácticas agrícolas como la milpa tradicional, que fue substituida por los sembradíos de ajonjolí hace 20 años, posteriormente pasó al cacahuete hace 10 años y, en la actualidad, la predominancia de sorgo forrajero. Este proceso de transformación estuvo influenciado por el contexto regional descrito en la sección anterior. Por ejemplo, en sus inicios, la mayoría de las tierras se trabajaba con yunta a través de tequio; no obstante, la relación precio/rendimiento del maíz, destinado en su mayoría al comercio local, obligó a los agricultores a migrar a otros productos. Décadas más tarde, la conformación de agrupaciones de productores les permitió la adquisición de maquinaria agrícola como tractores, lo cual, a pesar de ofrecer la posibilidad de trabajar terrenos más extensos en menor tiempo, significó la intensificación sin aumentar la superficie, esto debido a las restricciones impuestas por variables como la pendiente, principalmente en la región centro norte de los municipios de estudio. La tecnificación e intensificación del campo forzó a los agricultores al desarrollo de monocultivos, los cuales a su vez exigían el uso de fertilizantes y herbicidas químicos (principalmente en los últimos cinco años). Cabe resaltar que, en sus inicios, la mayoría de los cultivos se destinaba al autoconsumo y al comercio local, mientras que en la actualidad la mayor parte del sorgo se comercializa en mercados de mayor escala.

La ganadería, por su parte, ha sido una actividad medianamente estable desde sus inicios, en 1986. La mayoría de los ejidatarios y comuneros con cabezas de ganado las mantiene mediante prácticas de libre pastoreo en sus propias parcelas o en la superficie de uso común, donde predominan los sitios con mayor pendiente en donde desmontan para inducir el crecimiento de pasto o mantienen la vegetación natural que, además, les brinda recursos importantes como postes para la construcción de cercas. Cabe resaltar que el proceso de desmonte no suele ocurrir en las zonas de uso común. Además, se registró una dinámica de retroalimentación entre la ganaderización y la producción agrícola —sobre todo en últimos cinco años— en la que, debido a las fuertes sequías, muchos agricultores perdieron su cultivo; sin embargo, esto no significa la pérdida total de la inversión, pues los ganaderos rentan estas parcelas como áreas de agostadero en la época de estiaje. Como resultado, la renta impide el abandono de parcelas.

Los productores señalaron como causas que subyacen a la deforestación, a los cambios en la tenencia de la tierra como un factor fundamental, principalmente en núcleos agrarios como Mazahua, Aguascalientes la Mata, Mena Nizanda, Ciudad Ixtepec y la Ventosa, aunque a diferentes grados. Las transformaciones en la legislación referente a la tenencia de la tierra en los últimos 15 años profundizaron los conflictos por los límites entre comunidades, lo que catalizó la deforestación en las áreas en disputa. Al mismo tiempo, los productores describieron que programas como PROCEDE facilitaron el acaparamiento de tierras en Mena Nizanda en 1995, lo que dificultó el acceso a riachuelos y a zonas de libre pastero aún cubiertas por selva baja caducifolia; por otro lado, la posesión de títulos parcelarios, facilitados por el mismo programa gubernamental, ayudó en algunos casos a solucionar conflictos internos por la legitimidad de terrenos. En el sur del área de estudio, los agricultores describieron que existe deforestación por la reactivación del mercado local, por la venta de productos agrícolas como maíz y hortalizas, gracias al establecimiento del campamento militar en Ciudad Ixtepec, a principios de los años noventa. El campamento militar también abrió la posibilidad de empleo remunerado, lo que desmotivó el trabajo juvenil en el campo.

En relación con la conservación, los productores rescatan la importancia de programas como el establecimiento de Áreas Destinadas Voluntariamente a la Conservación (ADVC). Estas áreas son propuestas por los propios ejidatarios y comuneros ante la CONANP y suelen ser áreas conservadas tradicionalmente por los núcleos agrarios por diversas razones. El efecto de las ADVC sobre el territorio es claro, pues por reglamento, en ellas se impide el desarrollo de actividades, como el aprovechamiento maderable y no maderable, el libre pastoreo y el establecimiento de cultivos o pastizales —fortaleciendo la regulación comunitaria sobre el uso y manejo de los recursos naturales—. Las ADVC, además, implican la transferencia, aunque reducida, de fondos a los núcleos agrarios en las que se encuentran, pues la CONANP otorga pagos de jornales en temporadas de estiaje, para el establecimiento de brechas cortafuego y vigilancia. Finalmente, algunos entrevistados señalaron la falta organización interna como un factor que motiva la deforestación, lo que se agrava por las tensiones derivadas de la pertenencia a diferentes partidos políticos. Estas diferencias han mermado el apoyo destinado a la

conservación por parte de la cabecera municipal y han generado un clima de tensión, lo que dificulta la celebración de asambleas, sobre todo en los ejidos de Asunción Ixtaltepec y Aguascalientes la Mata. Cabe indicar que la erosión de las asambleas como espacios de control comunitario del territorio puede ser un factor que afecte la organización social y la forma en que las comunidades se relacionan con su territorio.

## **Análisis de factores desde un enfoque interdisciplinario.**

En términos generales, tanto el análisis basado en patrones como el de perspectiva local señalaron al tipo de suelo, a la topografía y a las variables climáticas (precipitación y evaporación potencial) como factores importantes que regularon el proceso de expansión agrícola, aunque estas variables se relacionan más íntimamente con la localización final de las parcelas productivas y no con el cambio en las tasas de expansión y abandono. Por su parte, la tasa de transformación estuvo más relacionada con variables como la política pública productiva (créditos para la producción y PROCAMPO) o las cuestiones relacionadas con el mercado. Esta última variable resultó muy importante tanto para el modelo de autómatas celulares (número de unidades de producción que destinan parte de su producción a la venta) como para los productores, quienes señalaron que el precio del sorgo y la capacidad para comercialarlo muchas veces determinaba la decisión de sembrar o no su parcela al inicio de la temporada. Por otro lado, cada enfoque identificó diferentes factores como importantes; por ejemplo, el enfoque cuantitativo no consideró como una variable significativa el uso de maquinaria agrícola; en cambio, para los productores es un factor que determina el tamaño final de las parcelas. Además, es posible contrastar los resultados obtenidos por ambos enfoques en cada periodo de análisis, es decir, 1986-1997, 1997-2004, 2004-2011 y 2011-2015.

Para el periodo de 1986-1997 el análisis estructural sugiere que la región experimentó un crecimiento económico importante, principalmente relacionado con la industria petroquímica y minera (no metálica). Este crecimiento fue impulsado por la construcción de plataformas petroleras, refinerías y proyectos extractivos en distintos puntos del Istmo de Tehuantepec, incluidos algunos núcleos agrarios del sitio de estudio. De acuerdo con los entrevistados y grupos

focales, este periodo se caracterizó por la migración de jóvenes hacia núcleos urbanos cercanos en busca de trabajo asalariado. En lo que respecta al análisis cuantitativo, se señaló como factor de cambio importante la pertenencia a núcleos agrarios como la Aguascalientes la Mata o Mazahua, cabe resaltar que este último ejido inició la operación de zonas de extracción de grava durante este periodo de análisis.

Durante el periodo de 1997-2004 se observó un importante decremento en las tasas de expansión agrícola y urbana. De acuerdo con el análisis estructural, en este periodo todas las zonas rurales de México sufrieron importantes transformaciones, muchas de ellas motivadas por la entrada de México al TLCAN, lo que impulsó la producción dirigida al mercado y la desaparición de subsidios para la producción. En este sentido, las entrevistas señalan que durante este mismo periodo muchos de los productores cambiaron de cultivo de maíz al sorgo, principalmente por el precio obtenido por la producción. Finalmente, el análisis cuantitativo señaló como factores importante la venta de cosechas y el número de créditos para la producción (los cuales pasaron de ser 100 unidades de producción en promedio a prácticamente cero).

Los años de 2004 a 2011 constituyeron un periodo caracterizado por sequías y una baja productividad agrícola de acuerdo con los entrevistados, aunque los datos climáticos no mostraron tales eventos. Además, muchos expresaron que, durante este periodo, se hizo común el uso de agroquímicos, principalmente motivado por las políticas públicas productivas. El cálculo de pesos de evidencia señaló al uso de agroquímicos por unidad de producción y la precipitación como factores que regularon positiva y negativamente al CUSV, respectivamente. En el contexto regional, de acuerdo con las entrevistas realizadas a funcionarios y autoridades ejidales, comenzaron a extenderse programas productivos, tanto agrícolas como ganaderos, que contemplaban capacitaciones para la producción y la entrega de insumos como herbicidas y pesticidas.

El último periodo de análisis, que comprendió los años de 2011 a 2015, estuvo caracterizado por el efecto de dos factores: la instauración de aerogeneradores y de ADVC. De acuerdo con el análisis estructural y de perspectiva local, ambos procesos produjeron nuevas

dinámicas sociales y económicas, con efectos territoriales directos e indirectos. En concordancia con este resultado, el cálculo de pesos de evidencia mostró que la distancia a aerogeneradores determinó en buena medida la expansión agrícola y urbana. Por su parte, las ADVC también figuraron como una variable importante al permitir la conservación de selvas, principalmente en áreas de uso común en diferentes núcleos agrarios.

## Discusión

### Contribuciones del modelo basado en patrones

El análisis de factores, a través del cálculo de pesos de evidencia, permitió identificar la importancia de cada variable, tanto por tipo de transición como por periodo. Además, gracias al análisis paralelo de potenciales de transición y escenarios fue posible entender a profundidad el papel que desempeña cada factor. Por ejemplo, tanto este análisis como otros desarrollados usando este mismo método, sugieren que factores como la distancia a las carreteras u otros usos de suelo preexistentes determinan la ubicación final de nuevos usos de suelo. Por otro lado, las variables biofísicas como la altitud, la pendiente o la evaporación potencial restringen o favorecen el CUSV a escala regional, pero ninguno de los dos grupos de factores (biofísicos y de distancia a infraestructura o parcelas) controlan las tasas de expansión agrícola, urbanización o degradación de la vegetación, las cuales dependen en mayor medida de factores como el acceso a créditos, la venta de la producción agrícola o la pertenencia a cierto núcleo agrario (Geist y Lambin 2001; Almeida *et al.* 2002; Kolb *et al.* 2013).

El extenso conjunto de factores analizados por los GLMM y los modelos de potencial de transición abren la posibilidad de analizar el papel que juega cada variable anualmente, proceso que no se puede realizar fácilmente por otros métodos cuantitativos como los modelos de ecuaciones estructurales, el particionamiento jerárquico o la regresión de cuadrados parciales (Baumann *et al.* 2011; Mas *et al.* 2014; Li *et al.* 2016). No obstante, pese a que estos métodos consideran la correlación entre variables, el área bajo la curva y los análisis de similitud muestran

que se sobrestima el cambio, principalmente entre sabanas y pastizales inducidos; esto puede deberse, entre otros factores, a la colinealidad entre variables o a que estas dos coberturas presentan una dinámica de recambio particular –la cual se describe en extenso en Calzada *et al.* (2018)–. Por otro lado, aunque el análisis cuantitativo brinda información sólida acerca del papel que desempeña cada factor sobre el proceso de CUSV, éste no establece una jerarquización clara entre factores, ni tampoco brinda información acerca de las relaciones que existen entre factores a diferentes escalas y el CUSV (Vásquez-León y Liverman 2004; Hazell y Wood 2008; Kolb *et al.* 2013). Por ejemplo, aunque el número de créditos fue considerado como un factor relevante para explicar la expansión urbana, de acuerdo con su valor de peso de evidencia, el modelo no esclarece la relación que existe entre el factor y el proceso. Esto puede generar explicaciones que, aunque válidas matemáticamente, no dan cuenta realmente del proceso de CUSV en su totalidad.

Otra característica que resalta del modelo basado en patrones es la posibilidad de entender a profundidad la relación entre cada factor y los tipos de transición; es decir, no solamente indica si el factor explica el cambio o no, sino que dependiendo de los valores que tome la variable explicativa, ésta puede motivar o desincentivar la transición de uso de suelo. Por ejemplo, en el caso de la pendiente y el tipo de suelo, y su relación con la transición de vegetación primaria a zonas agrícolas y pecuarias, el primer factor motiva el cambio, si sus valores son cercanos a cero, mientras que con valores cercanos a 30° desincentiva fuertemente la apertura de nuevas parcelas productivas. Así mismo, los valores de pesos de evidencia y de potencial de transición indican que algunos tipos de suelo motivan la expansión agrícola, mientras que otros la restringen de manera importante. Este tipo de relaciones no puede ser analizada si se usan métodos como las regresiones lineales o las particiones jerárquicas (Reid *et al.* 2000; Burgos y Maass 2004). Además, el uso simultáneo de GLMM y entrevistas permitió identificar los factores clave que después se analizarían por el modelo basado en patrones. Por ejemplo, la primera herramienta permitió seleccionar entre variables de política pública fuertemente correlacionadas como el número de créditos y seguros para la producción, cuando la segunda variable no resultó significativa; esto no significa que los seguros no tengan un efecto sobre el CUSV, sino que podemos entender su relación a través de los créditos asignados por núcleo agrario. En lo que respecta a las entrevistas,

éstas permitieron incorporar variables como la distancia a aerogeneradores y las ADVC, las cuales figuraron como factores importantes en todas las transiciones para el periodo 2011-2015, pero que hubieran quedado excluidas debido a que sólo se pueden evaluar en el último lustro y no durante todo el periodo de análisis (1986-2015).

Una limitante que es evidente en todos los métodos cuantitativos (incluido los modelos basados en patrones y los GLMM), es la disponibilidad y calidad de los datos. A pesar de que este estudio presenta una amplia gama de variables biofísicas, sociodemográficas y económicas, éstas poseen una disponibilidad temporal y resolución espacial muy distinta. Por ejemplo, para la interpolación de datos climáticos se utilizaron mediciones diarias de precipitación, temperatura y evaporación potencial para 10 estaciones meteorológicas distintas; por su parte, la altitud y pendiente se obtuvieron a partir de imágenes LiDAR, con una resolución de 15 m, es decir, con una resolución espacial mayor a las clasificaciones de uso de suelo que se utilizaron como variable de respuesta (30 m). Por otro lado, las variables agroproductivas, como la disponibilidad de créditos o la venta de la producción agrícola (vinculación con el mercado) se obtuvieron de censos agrícolas a escala de localidad y con una periodicidad de 10 años, lo que oculta gran parte de la dinámica temporal. Estas diferencias tuvieron repercusiones claras sobre el desempeño del GLMM y del modelo basado en patrones, en los que gran parte del poder explicativo se atribuyó a variables biofísicas (de alta resolución espacial y temporal), mientras que las variables demográficas y socioeconómicas no siempre resultaron significativas o poseían pesos de evidencia bajos para el GLMM y el modelo basado en patrones, respectivamente. Además, la inclusión de factores depende de la disponibilidad de la información

Por último, las diferencias mostradas por el análisis de similitud entre el escenario de uso de suelo obtenido por el algoritmo de autómatas celulares y la clasificación supervisada de imágenes Landsat, parecen indicar que los factores empleados en el modelo explican solamente una parte del fenómeno. En este sentido, existen tres alternativas posibles: (1) aumentar la calidad o cantidad de datos de variables utilizadas para generar los escenarios de cambio de uso de suelo, lo que a su vez presentaría importantes retos, pues buena parte de los datos utilizados dependen

del desempeño de las instituciones de gobierno que generan los censos, tanto agrícolas como de población, además de que la generación de estos datos representa un esfuerzo muy grande por lo que no siempre puede ser atendido con el suficiente detalle; (2) como lo sugieren las variables de pertenencia a un cierto núcleo agrario y la delimitación intracomunitaria del territorio, el CUSV tiene dinámicas y tasas de transición que varían por región o tipo de vegetación (como las sabanas), por lo que desarrollar un modelo regionalizado permitiría aumentar la similitud entre los escenarios y las clasificaciones, afortunadamente esto es posible utilizando la misma plataforma de análisis (DINAMICA EGO), y (3) existen procesos que no pueden ser modelados, por su naturaleza, por lo que se puede lograr una descripción profunda del CUSV a través del diálogo horizontal entre enfoques metodológicos. Es justo a partir de esta alternativa que el desarrollo simultáneo del análisis estructural y de la perspectiva local del cambio desarrollados en este estudio abren una posibilidad para una discusión que comprenda factores y procesos a distintas escalas.

## **Contribuciones del análisis estructural y de perspectiva local del CUSV**

El proceso de cambio de uso de suelo depende de una interacción continua entre distintos procesos a múltiples escalas. Como se ha discutido en la literatura (Reid *et al.* 2000; Geist y Lambin 2001; Veldkamp y Lambin 2001; Agarwal *et al.* 2002), destacan los factores sociopolíticos, biológicos, climáticos y económicos desde las escalas locales hasta las internacionales. Las dinámicas de cambio observadas durante treinta años en los dos municipios de estudio no escapan a las presiones que ejercen los factores señalados como determinantes; por ejemplo, el efecto del mercado y la política pública a escala extralocal y las variables agroclimáticas, topográficas y de organización institucional a escala local. Más aún, cada núcleo agrario presenta una dinámica muy particular, a pesar de la cercanía y colindancia. Por ejemplo, Mena Nizanda se caracteriza por la agricultura minifundista, desarrollada fundamentalmente por ejidatarios de mayor edad que son en su mayoría jubilados de empresas paraestatales. Ciudad Ixtepec, por su parte, posee un importante bloque de producción de sorgo por riego destinada al

mercado externo, mientras que Aguascalientes la Mata ha entrado en dinámicas de organización adaptadas a la entrada de empresas trasnacionales del ramo energético y Mazahua, aunque con una población abocada al sector agrícola, tiene esquemas de aprovechamiento minero no metálico.

La escala, es uno de los principales retos cuando se aborda un estudio de CUSV. Una práctica común en los modelos explicativos, tanto cuantitativos como cualitativos, es centrarse en explicar una sola escala. Reid *et al.* (2000) señalan que es debido a este aspecto que muchas variables son tratadas como “ruido” o fenómenos estocásticos. El enfoque de la ecología política permite analizar los cambios a partir de las estructuras y relaciones sociopolíticas y económicas, considerando factores y procesos que permiten generar explicaciones más ricas (Ciriacy-Wantrup 1964; Bryant y Bailey 1997; Robbins 2012). Finalmente, el producir explicaciones más robustas permite una toma de decisiones realista, que no generalice o ignore los procesos que se generan en regiones específicas. En este último aspecto, algunos autores señalan la total ausencia de la adopción de los factores locales en las explicaciones (Reid *et al.* 2000; Vásquez-León y Liverman 2004; Sanderson 2005). Además, este estudio surge que no basta con incorporar los factores regionales y locales, pues algunos aspectos globales pueden estar íntimamente relacionados con la dinámica territorial a escala local.

Las grandes diferencias encontradas en el proceso de CUSV en cada núcleo agrario pueden atribuirse a que el Istmo de Tehuantepec se ha destacado por ser una región económica donde continuamente se contrastan múltiples visiones y objetivos de desarrollo. En este contexto surge la siguiente pregunta ¿qué factores son los más importantes y a qué escala operan? En primera instancia, los factores a escala regional han regulado las actividades económicas de los habitantes de todos los ejidos y la comunidad en el sitio de estudio y son las transformaciones en estas actividades lo que ejerce el efecto más importante sobre uso del territorio con fines agrícolas y ganaderos. En segunda instancia, la puesta en marcha de políticas federales y estatales, principalmente relacionadas con la de producción agrícola y apertura de mercados (e.g., el TLC y PROCAMPO), los cambios en la regulación de la tenencia de la tierra (e.g., PROCEDE) y las

relacionadas con la conservación (e.g. ADVC), son las que parecen tener los efectos más prominentes, sobre todo en las últimas dos décadas. Estos tres tipos de política pública se han señalado como factores importantes para explicar el CUSV en otras zonas tropicales (Lambien *et al.* 2003).

Dada la tendencia de cambio en la región y el contraste con otras regiones tropicales en países en vías de desarrollo, resultaría una explicación somera y poco acertada el atribuir la mayor importancia sobre el CUSV a factores como el crecimiento poblacional, la migración y la expansión de ciudades. No obstante, el análisis basado en la perspectiva local permitió entender las interacciones múltiples que se dan en las comunidades agrarias que, aunque cercanas entre sí, experimentan procesos particulares. Aunado a esto, los entrevistados aportaron una descripción sobre el cambio en una resolución temporal mayor, al abordar eventos de transformación anuales y de larga data, a diferencia de lo que era posible observar en el análisis satelital, que contemplaba una imagen por década. El aumento de la resolución temporal en el análisis cartográfico permitiría realizar un análisis más minucioso y detallado, abordando de mejor manera fenómenos como la retroalimentación entre dos actividades económicas o la adaptación de una comunidad ante un efecto directo determinado.

De manera interesante, algunos factores que se señalan como importantes sobre la dinámica de cambio en regiones tropicales no parecen tener efectos prominentes en el sitio, como el aumento poblacional o, procesos de acaparamiento de tierras por parte de empresas transnacionales agroindustriales (Lambin *et al.* 2001; Lambin y Meyfroidt 2011). En relación con las perspectivas locales sobre los factores que influyen en los cambios ambientales, cabe destacar también cómo la gente entiende y le da significado al cambio de uso de suelo desde distintas posturas. Para algunos de los entrevistados, los procesos de defaunación, la pérdida de la belleza escénica o la desaparición de especies de interés constituían en sí mismos como una pérdida, convirtiendo los sitios en algo distinto a la selva. Este conjunto de aproximaciones permite rescatar elementos que enriquecen la explicación y clasificación de factores y procesos de transformación de los ecosistemas.

A pesar de que las tasas de deforestación, la expansión agrícola y el establecimiento de pastizales no deben ser tomadas a la ligera, salta a la vista otra pregunta, ¿por qué con una larga historia de iniciativas, inversiones y actores impulsando el desarrollo, no se ha transformado en su totalidad en uso de suelo antropizado? La respuesta completa a esta pregunta escapa a los límites de esta investigación. No obstante, es claro que en parte a que son zonas no aptas para las actividades agropecuarias. Por otro lado, se puede deber a que la presión sobre las tierras disminuye debido al acceso a pensiones, las dinámicas como la institucionalización del “*Derecho de viento*”, la renta de parcelas entre agricultores y ganaderos, el respeto a las ADVC como acuerdos colectivos de conservación (destaca el elemento voluntario en el propio nombre de la política) o los elementos culturales asociados a la conservación y uso de los recursos, que está presente en algunos núcleos agrarios. Todos estos procesos señalan cómo la estructura social, las instituciones locales y los rasgos culturales han permitido la rápida adaptación y los procesos de resistencia a ciertos cambios en los ejidos y la comunidad. Esto finalmente se traduce en un equilibrio dinámico entre conservación y aprovechamiento, que impide que surjan tasas de deforestación abrumadoras como las observadas en regiones como Veracruz, Quintana Roo o Yucatán, estados que poseen bosques tropicales secos o condiciones económicas similares.

## **Reflexión final y recomendaciones**

El estudio del proceso de CUSV en la última década ha presentado un importante dinamismo, tanto teórico como práctico; ejemplo de ello es el desarrollo de la denominada Ciencia del Uso del Suelo (*Land Use Science*; Rindfuss *et al.* 2004; Turner y Robbins 2008). Aunque el presente estudio no incorpora de manera directa este concepto, sí se encuentra inserto en la efervescente discusión que se ha suscitado en torno al uso de teorías y metodologías. La aproximación interdisciplinaria de este estudio, aunque somera, deja entrever los alcances que ofrece cada marco y, más aún, cómo a través del diálogo y la complementariedad es posible combatir muchas de las limitaciones de cada enfoque, entendiendo así factores que no pueden ser incorporados en el modelo basado en patrones o bien, que gracias a éste se entiende una relación cuantificable que no se podría analizar desde un análisis estructural o de perspectiva local. A pesar de que se

contrastaron ambos modelos, queda la interrogante de cómo realmente se podría utilizar el modelo cuantitativo para generar grupos focales y entrevistas mejor dirigidos al entendimiento de factores, o, por el contrario, cómo a través del análisis estructural y de perspectiva local se pueden elegir factores que generen modelos con áreas bajo la curva más cercanas a 1.

De acuerdo con los resultados obtenidos en este estudio y en coincidencia con conclusiones reportadas en la literatura (Briassoulis 2000; Rindfuss *et al.* 2004; Turner y Robbins 2008), la mejor opción para entender procesos de cambio ambiental es transitar hacia enfoques de investigación nutridos con diferentes perspectivas epistemológicas, teóricas y metodológicas, por lo cual conceptos como la multidisciplinaria, la interdisciplinaria y la transdisciplinaria son de gran relevancia. Este es el caso de esta última, sobre todo, pues permite la formulación de preguntas de investigación no sólo desde diferentes ciencias, sino también desde diversas formas de pensamiento que incluyen el conocimiento local y tradicional, que sin duda permiten entender de diversas maneras los procesos de retroalimentación y la toma de decisiones sobre cambios en el terreno de una manera más integral. Los ejemplos mostrados en esta sección ayudaron a entender de manera más completa la importancia relativa que tiene cada factor, dependiendo el enfoque metodológico que se emplee; sin embargo, al complementar las visiones es posible entender las relaciones entre factores, así como procesos de retroalimentación que dependen de factores a diferentes escalas desde la internacional hasta la local.

## Conclusiones

El análisis de factores socioeconómicos, políticos y biofísicos sobre la dinámica de CUSV en dos municipios ubicados en el istmo oaxaqueño arrojó tres conclusiones principales

1. De acuerdo con el modelo basado en patrones, la dinámica de CUSV depende de distintos factores en cada periodo. Destaca el papel de los factores biofísicos para explicar la dinámica espacial del cambio. Por su parte, factores sociopolíticos y económicos, tales como la designación territorial intracomunitaria y la venta de la producción agrícola, actúan como factores determinantes para explicar la dinámica temporal del CUSV. Esto sugiere que los factores de corte biofísico parecen explicar la mayor parte de la variación debido a que son variables, en su mayoría, cuantitativas continuas, aunque son los factores sociopolíticos y económicos los que finalmente detonan los procesos de cambio en el territorio.
2. El análisis estructural y de percepción local mostró que algunas variables no espacializables, como el acceso a mercados, los precios de la producción agrícola, la migración y el efecto de distintas políticas públicas productivas explican el proceso de toma de decisiones en torno al acceso a los recursos y, por ende, la dinámica espacial de los municipios de estudio. Este enfoque refuerza la idea de que es necesario considerar factores extra locales y procesos sociales no siempre modelables para explicar un proceso complejo como el CUSV.
3. La aproximación desde diferentes marcos mostró que existe una fuerte asociación entre procesos como la entrada de México al TLCAN, la subsecuente desaparición de la asignación de créditos para la producción y el cambio de cultivos de maíz a sorgo y la influencia de los precios de mercado. Este proceso refuerza la idea de que únicamente es posible abordar las relaciones entre factores de cambio y los procesos de retroalimentación al contrastar marcos teóricos y metodológicos distintos.

Finalmente, esta investigación pone de manifiesto que el proceso de CUSV depende de una compleja interrelación entre factores biofísicos, económicos y sociopolíticos. También expone la necesidad de abordar el proceso de cambio en el espacio desde múltiples posturas, lo que permite analizar el cambio de uso de suelo y sus factores de una manera más detallada el cambio en múltiples escalas espacio temporales.

# Referencias

- Adegoke, J.O., Pielke, R. y Carleton, A.M. (2007). Observational and modeling studies of the impacts of agriculture-related land use change on planetary boundary layer processes in the central U.S. *Agricultural and Forest Meteorology*, 142 (2-4), 203–215.
- Agarwal, C., Green, G.M., Grove, J.M., Evans, T.P. y Schweik, C.M. (2002). A review and assessment of land-use change models: dynamics of space, time, and human choice. *Gen. Tech. Rep. NE-297*. Newton Square, PA: US Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Research Station. 61 p., 297.
- Agrawal, A. y Ostrom, E. (2006). Political science and conservation biology: a dialog of the deaf. *Conservation Biology*, 20(3), 681–682.
- Alix-Garcia, J., de Janvry, A. y Sadoulet, E. (2005). A tale of two communities: explaining deforestation in Mexico. *World Development*, 33(2), 219–235.
- Almeida, C.M., Monteiro, A.M.V., Câmara, G., Soares-Filho, B.S., Cerqueira, G.C. y Pennachin, C.L. (2002). Modeling urban land use dynamics through bayesian probabilistic methods in a cellular automaton environment. Presentado en: *Proceedings of the 29th International Symposium on Remote Sensing of the Environment*.
- Alonso, W. (2014). *Location and land use, toward a general theory of land rent*. (201 p.). Harvard University Press, Londres, Inglaterra.
- Appendini, K.A., Calva, J.L., Quintana, R.D., García, L.R., Gómez Cruz, M.A., Carton de Grammont, H., López Gámez, E., Moreno, E., Navarro, C.E., Pérez Espejo, R. y Schwentesius Rindermann, R. (1993). *Alternativas para el campo mexicano*. (250 p.). Distribuciones Fontamara, PUAL-UNAM, Fundación Friedrich Ebert, México D.F., México.
- Bartra, R. (1972). Campesinado y poder político en México: un modelo teórico. *Revista Mexicana de Sociología*, 34(3-4), 659–684.
- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B. & Walker, S. (2015). Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67(1), 1-48.
- Baumann, M., Kuemmerle, T., Elbakidze, M., Ozdogan, M., Radeloff, V.C., Keuler, N.S., Prishchepov, A.V., Kruhlov, I. y Hostert, P. (2011). Patterns and drivers of post-socialist farmland abandonment in Western Ukraine. *Land Use Policy*, 28(3), 552–562.
- Biermann, F. (2012). Planetary boundaries and earth system governance: Exploring the links. *Ecological Economics*, 81, 4–9.
- Blaikie, P., Brookfield, H. y Allen, B. (1987). *Land Degradation and Society* (222 pp.). Routledge Press, Londres, Inglaterra.
- Braña Varela, J. y Martínez Cruz, A.L. (2005). El PROCEDE y su impacto en la toma de decisiones sobre los recursos de uso común. *Gaceta Ecológica*, (79), 35-49.
- Brenner, L. y Rosales Ortega, R. (2015). Introducción: procesos de construcción de gobernanza. En: *Geografía de la gobernanza: dinámicas multiescales de los procesos económico-ambientales* (Editores: Brenner, L. y Rosales Ortega, R.). Universidad Autónoma Metropolitana; Siglo XXI, México D.F., México, pp. 7–19.

- Briassoulis, H. (2000). *Analysis of Land Use Change: Theoretical and Modeling Approaches* (Tesis Doctoral). Regional Research Institute, West Virginia University. Virginia. EUA.
- Bryant, R.L. y Bailey, S. (1997). *Third World Political Ecology* (216 pp.). Psychology Press, Routledge Press, Nueva York, EUA.
- Burgos, A. y Maass, J.M. (2004). Vegetation change associated with land-use in tropical dry forest areas of Western Mexico. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 104(3), 475–481.
- Calzada, L., Meave, J.A., Bonfil, C. y Figueroa, F. (2018). Lands at risk: land use/land cover change in two contrasting tropical dry regions of Mexico. *Applied Geography*, 99, 22–30.
- Campbell, D.J., Lusch, D.P., Smucker, T.A. y Wangui, E.E. (2005). Multiple methods in the study of driving forces of land use and land cover change: a case study of SE Kajiado District, Kenya. *Human Ecology*, 33(6), 763–794.
- Carr, D.L., Suter, L. y Barbieri, A. (2005). Population dynamics and tropical deforestation: state of the debate and conceptual challenges. *Population and Environment*, 27(1), 89–113.
- Carr, M. (1997). *New patterns: process and change in human geography* (527 pp.). Nelson Thornes. Londres, Inglaterra.
- Cash, D., Adger, W.N., Berkes, F., Garden, P., Lebel, L., Olsson, P., Pitchard, L. y Young, O. (2006). Scale and cross-scale dynamics: governance and information in a multilevel world. *Ecology and Society*, 11(2).
- Castella, J.-C. y Verburg, P.H. (2007). Combination of process-oriented and pattern-oriented models of land-use change in a mountain area of Vietnam. *Ecological Modelling*, 202(3-4), 410–420.
- Castree, N., Adams, W.M., Barry, J., Brockington, D., Büscher, B., Corbera, E., Demeritt, D., Duffy, R., Felt, U., Neves, K., Newell, P., Pellizzoni, L., Rigby, K., Robbins, P., Robin, L., Rose, D.B., Ross, A., Scholten, D., Sörlin, S., West, P., Whitehead, M. y Wynne, B. (2014). Changing the intellectual climate. *Nature Climate Change*, 4(9), 763–768.
- Chávez, A. (2014). La disputa por el viento en el Istmo: datos cargados a favor de la empresa Eólicas del Sur en el Istmo de Tehuantepec. *Ojarasca*, 212, 3-8.
- Chávez-Servia, J.L., Tuxtill, J. y Jarvis, D.I. (2004). *Manejo de la diversidad de los cultivos en los agroecosistemas tradicionales*. Instituto Internacional de Recursos Fitogenéticos, Roma, Italia.
- Cinner, J.E., McClanahan, T.R., MacNeil, M.A., Graham, N.A.J., Daw, T.M., Mukminin, A., Feary, D.A., Rabcarisoa, A.L., Wamukota, A., Jiddawi, N., Campbell, S.J., Baird, A.H., Januchowski-Hartley, F.A., Hamed, S., Lahari, R., Morove, T. y Kuange, J. (2012). Co-management of coral reef social-ecological systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 109(4), 5219–5222.
- Ciriacy-Wantrup, S.V. (1964). The new competition for land and some implications for public policy. *Natural Resources*, 4(2), 252-267.
- Clement, F. (2010). Analysing decentralised natural resource governance: proposition for a “politicised” institutional analysis and development framework. *Policy Sciences*, 43(2), 129–156.
- Cohen, W.B. y Goward, S.N. (2004). Landsat’s role in ecological applications of remote sensing. *BioScience*, 54(6), 535–545.

- Comber, A., Li, T., Lü, Y., Fu, B. y Harris, P. (2017). Geographically Weighted Structural Equation Models: spatial variation in the drivers of environmental restoration effectiveness. *Societal Geo-Innovation* 20th AGILE Conference Proceedings.
- CONABIO, CONANP, TNC, PRONATURA, FCF y UANL. (2007). *Análisis de vacíos u omisiones en conservación de la biodiversidad terrestre de México: Espacios y especies* (Editores: Koleff, P., Lira-Noriega, A., Cantú, C., Urquiza, T. y Kolb, M.). Comisión Nacional Para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, The Nature Conservancy, PRONATURA, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León, Mexico.
- CONANP (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas). (2016). *Capa vectorial de áreas naturales protegidas*. México D.F., México.
- Coronado Malagón, M. (2009). Los zapotecos y el sistema ferroviario del Istmo. En: *El Istmo Mexicano: Una Región Inasequible. Estado, Poderes Locales y Dinámicas Espaciales (siglos XVI-XXI)* (Editores: Hernández, E., Léonard, E., Hoffman, O. y Prévôt-Schapira, M.F.). Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social, México D.F., México, pp. 221–264.
- Cortes Forero, R., Caldo, A. y Granada Garces, I. (2017). *Marco conceptual de Megaproyectos de Transporte para América Latina y el Caribe*. Banco Interamericano de Desarrollo. Washington D.C., EUA.
- Cuevas, G. y Mas, J.F. (2008). Land use scenarios: a communication tool with local communities. En: *Modelling environmental dynamics* (Editores: Paegerlow, M. y Camacho Olmedo M.T.). Springer, Berlín, Alemania pp. 223–246.
- Deng, J.S., Wang, K., Deng, Y.H. y Qi, G.J. (2008). PCA-based land-use change detection and analysis using multitemporal and multisensor satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 29(16), 4823–4838.
- Duit, A. y Galaz, V. (2008). Governance and complexity —emerging issues for governance theory. *Governance*, 21(3), 311–335.
- Escobar, A. (1999). After nature: steps to an antiessentialist Political Ecology. *Current Anthropology*, 40(1), 1–30.
- Evans, N.J. y Ilbery, B.W. (1992). Farm-based accommodation and the restructuring of agriculture: evidence from three English counties. *Journal of Rural Studies*, 8(1), 85–96.
- Farmer, G.T. y Cook, J. (2013). *Climate Change Science: A Modern Synthesis: Volume 1 - The Physical Climate*. (563 pp.) Springer Science & Business Media. Londres, Inglaterra.
- Fischer, F. (2000). The return of the particular. En: *Citizens, Experts, and the Environment: The Politics of Local Knowledge* (Editor: Fisher, F.). Duke University Press, Durham, Inglaterra pp. 68-86.
- Flyvbjerg, B., Bruzelius, N. y Rothengatter, W. (2003). *Megaprojects and risk: an anatomy of ambition*. (213 p.) Cambridge University Press. Londres, Inglaterra.
- Foley, J.A., DeFries, R., Asner, G.P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S.R., Chapin, F.S., Coe, M.T., Daily, G.C., Gibbs, H.K., Helkowski, J.H., Holloway, T., Howard, E.A., Kucharik, C.J., Monfreda, C., Patz, J.A., Colin Prentice, I., Ramankutty, N. y Snyder, P.K.(2005). Global consequences of land use. *Science*, 309(5734), 570–574.

- Gallopín, G.C. (2006). Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity. *Global Environmental Change*, 16(3), 293–303.
- Gasparri, N.I. y Grau, H.R. (2009). Deforestation and fragmentation of Chaco dry forest in NW Argentina (1972-2007). *Forest Ecology and Management*, 258(6), 913–921.
- Geist, H.J. y Lambin, E.F. (2001). *What drives tropical deforestation. LUCR Report Series*, 4 (136 pp.). Ciaco Printshop, Bruselas, Bélgica.
- Geocomunes. (2017). Conjunto de datos relacionados con proyectos de generación de energía. México D.F., México.
- Goodman, L.A. (1961). Snowball sampling. *The Annals of Mathematical Statistics*, 32(1), 148–170.
- Grace, J.B. y Keeley, J.E. (2006). A structural equation model analysis of postfire plant diversity in California shrublands. *Ecological Applications*, 16(2), 503–514.
- Hazell, P. y Wood, S. (2008). Drivers of change in global agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1491), 495–515.
- Hernández, E.V., Leonard, E., Hoffman, O. y Prévôt-Schapira, M.F. (Editores). (2009). *El Istmo Mexicano: Una Región Inasequible. Estado, Poderes Locales y Dinámicas Espaciales (siglos XVI-XXI)*. Publicaciones de la casa chata. Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social. México D.F., México.
- Herrmann, S.M., Sall, I. y Sy, O. (2014). People and pixels in the Sahel: a study linking coarse-resolution remote sensing observations to land users perceptions of their changing environment in Senegal. *Ecology and Society*, 19(3).
- Hubacek, K., Vazquez, J., Colledge, H. y Fischer, G. (2002). *The Economics of Land Use Change*. En: Economics Interactions with other disciplines (Editor: Gowdy, J.). EOLSS Publisher, Ciudad de Singapur, Singapur.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (1990). Censo nacional de población y vivienda. México D.F., México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (1991). Censo agropecuario nacional. México D.F., México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2000). Censo nacional de población y vivienda. México D.F., México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2007). Censo agropecuario nacional. México D.F., México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2010). Censo nacional de población y vivienda. México D.F., México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2013a). Continuo de elevaciones mexicano (versión 3.0). México D.F., México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2013b). Carta edafológica/geológica regional del estado de Oaxaca (serie II). México D.F., México.

- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2014). Diccionario de datos edafológicos (versión 4). México D.F., México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2015). Conjunto de datos de aguas superficiales (versión 2.0). México D.F., México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2017). Red Nacional de caminos. México D.F., México.
- Irwin, E.G. y Geoghegan, J. (2001). Theory, data, methods: developing spatially explicit economic models of land use change. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 85(1-3), 7–24.
- Jara Castillo, E. (2012). Problemática en torno a la construcción de parques eólicos en el Istmo de Tehuantepec. *Desarrollo Local Sostenible*, 4(12), 2-15.
- Jarosz, L. (2006). Defining Deforestation in Madagascar. En: *Liberation ecologies: environment, development, social movements* (Editores: Pect, R. y Watts, M.). Routledge; Taylor and Francis Group, Nueva York, EUA., pp. 148–164.
- Jessop, B. (1997). The governance of complexity and the complexity of governance: Preliminary remarks on some problems and limits of economic guidance. En: *Beyond market and hierarchy: interactive governance and social complexity* (Editores: Hausner, J., y Amin, A.). European Association for Evolutionary Political Economy (EAEPE), Cheltenham, Reino Unido, pp. 95–128.
- Juárez-Hernández, S. y León, G. (2014). Energía eólica en el istmo de Tehuantepec: desarrollo, actores y oposición social. *Problemas del Desarrollo*, 45(178), 139–162.
- Kitzinger, J. (1995). Qualitative Research: Introducing focus groups. *British Medical Journal*, 311, 299–302.
- Kolb, M., Mas, J.-F. y Galicia, L. (2013). Evaluating drivers of land-use change and transition potential models in a complex landscape in Southern Mexico. *International Journal of Geographical Information Science*, 27(9), 1804–1827.
- Krzyzanowski, W. (1927). Review of the literature of the location of industries. *Journal of Political Economy*, 35(2), 278–291.
- Kuhn, S.T. (2011). *La estructura de las Revoluciones Científicas*. Fondo de Cultura Económica. México D.F., México.
- Lambin, E.F., Geist, H.J. y Lepers, E. (2003). Dynamics of land-use and land-cover change in tropical regions. *Annual Review of Environment and Resources*, 28(1), 205–241.
- Lambin, E.F. y Meyfroidt, P. (2011). Global land use change, economic globalization, and the looming land scarcity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 108(9), 3465–3472.
- Lambin, E.F., Turner, B.L., Geist, H.J., Agbola, S.B., Angelsen, A., Bruce, J.W., Coomes, O.T., Dirzo, R., Fisher, G., Folke, C., George, P.S., Homewood, K., Imbernon, J., Leemans, R., Li, X., Moran, E.F., Mortimore, M., Ramakrishnan, P.S., Richards, J.F. Skanes, H., Steffen, W., Stone, G.D., Svedin, U., Velskamp, T.A., Vogel, C. y Xu, J. (2001). The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. *Global Environmental Change*, 11(4), 261–269.
- Lawrence, R.J. (1989). Structuralist Theories in Environment —behavior —design Research. En: *Advance in environment* (Editor: Lawrence, R.J.). Springer, Nueva York, EUA., pp. 37–70.

- Léonard, E. (2009). Los empresarios de la frontera agraria y la construcción de los territorios de la ganadería: La colonización y la ganaderización del Istmo central, 1950-1985. En: *El Istmo Mexicano: Una Región Inasequible. Estado, Poderes Locales y Dinámicas Espaciales (siglos XVI-XXI)* (Editores: Hernández, E., Léonard, E., Hoffman, O. y Prévôt-Schapira, M.F.). Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social, México D.F., México, pp. 501–576.
- Li, A., Linderman, M., Qi, J., Shortridge, A. y Liu, J. (2005). Exploring complexity in a human-environment system: an agent-based spatial model for multidisciplinary and multiscale integration. *Annals of the Association of American Geographers*, 95(1), 54–79.
- Li, X., Wang, Y., Li, J. y Lei, B. (2016). Physical and socioeconomic driving forces of land-use and land-cover changes: a case study of Wuhan City, China. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2016.
- Liu, J., Dietz, T., Carpenter, S.R., Alberti, M., Folke, C. y Moran, E., Pell, A.N., Deadman, P., Kratz, T., Lubchenco, J., Ostrom, E., Ouyang, Z., Provencher, W., Redman, C.L., Schneider, S.H. y Taylor, W. (2007). Complexity of coupled human and natural systems. *Science*, 317(5844), 1513–1516.
- Long, N. (2007). *Sociología del Desarrollo: Una Perspectiva Centrada en el Actor*. CIESAS. México D.F., México
- Lösch, A. (1938). The nature of economic regions. *Southern Economic Journal*, 5, 71–78.
- Marsh, G.P. (1864). *Man and Nature: Or, Physical Geography as Modified by Human Action* (512 pp.). Belknap Press of Harvard University Press, Massachusetts, EUA.
- Martínez González, M. y Gómez Suárez, Á. (2017). Vientos del capitalismo verde: globalización, desarrollo y transición energética en el Istmo de Tehuantepec (Oaxaca, México), *Ciencia y Trópico*, 41(1), 15-53.
- Mas, J.F., Kolb, M., Paegelow, M., Camacho Olmedo, M.T. y Houct, T. (2014). Inductive pattern-based land use/cover change models: a comparison of four software packages. *Environmental Modelling & Software*, 51, 94–111.
- McKenzie, R.D. (1967). The ecological approach to the study of the human community. En: *The City* (Editores: Park, R.E., Burgess, E.W. y McKenzie, R.D.). University of Chicago Press, Chicago, EUA., pp. 63–79.
- Meave, J.A., Romero-Romero, M.A., Salas-Morales, S.H., Pérez-García, E.A. y Gallardo-Cruz, J.A. (2012). Diversidad, amenazas y oportunidades para la conservación del bosque tropical caducifolio en el estado de Oaxaca, México. *Revista Ecosistemas*, 21(1-2), 85-100.
- Merino-Pérez, L. y Segura-Warnholtz, G. (2007). Las políticas forestales y de conservación y sus impactos en las comunidades forestales en México. En: *Los bosques comunitarios de México. Manejo sustentable de paisajes forestales* (Editores: Bray, D., Merino, L. y Barry, D.). Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT), Ciudad de México, México, pp. 21–49.
- Midgley, J. y Livermore, M. (2009). *The Handbook of Social Policy* (607 pp.) SAGE Publications. California, EUA.
- Miranda, F. y Hernández-X., E. (2014). *Los tipos de vegetación de México y su clasificación*. 1ª Edición conmemorativa. Sociedad Botánica Mexicana de México, CONABIO, FCE, México D.F., México.
- Moberg, F. y Simonsen, H.S. (2011). *What is resilience? An introduction to social-ecological research*. (20 pp.) Stockholm Resilience Centre (SCR), Estocolmo, Suecia.
- Moss, M.R. y Turner, M. (2007). *Foundation Papers in Landscape Ecology* (608 pp.) Columbia University Press. Nueva York, EUA.

- North, D.C. (1990). *Institutions, Institutional Change and Economic Performance: Political Economy of Institutions and Decisions* (152 pp.). Cambridge University Press, Nueva York, EUA.
- Ozelkan, E., Bagis, S., Ozelkan, E.C., Ustundag, B.B., Yucel, M. y Ormeci, C. (2015). Spatial interpolation of climatic variables using land surface temperature and modified inverse distance weighting. *International Journal of Remote Sensing*, 36(4), 1000–1025.
- Park, R.E., Burgess, E.W. y McKenzie, R.D. (1967). *The City* (231 pp.). University of Chicago Press., Chicago, EUA.
- Pérez-García, E.A., Meave, J.A. y Cevallos-Ferriz, S.R.S. (2012). Flora and vegetation of the seasonally dry tropics in Mexico: origins and biogeographical implications. *Acta Botanica Mexicana*, 100, 149–193.
- Pérez García, E.A., Meave, J.A. y Gallardo, C. (2001). Vegetación y flora de la región de Nizanda, istmo de Tehuantepec, Oaxaca, México. *Acta Botánica Mexicana*, 56, 19-88.
- Pérez-Vega, A., Mas, J.-F. y Ligmann-Zielinska, A. (2012). Comparing two approaches to land use/cover change modeling and their implications for the assessment of biodiversity loss in a deciduous tropical forest. *Environmental Modelling & Software*, 29(1), 11–23.
- Prévôt-Schapira, M.F. (2009). Istmo de Tehuantepec: el archipiélago petrolero, territorios entre lo nacional y lo local. En: *El Istmo Mexicano: Una Región Inasequible. Estado, Poderes Locales y Dinámicas Espaciales (siglos XVI-XXI)* (Editores: Hernández, E., Léonard, E., Hoffman, O. y Prévôt-Schapira, M.F.). Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social, México D.F., México, pp. 501–576.
- Quesada, M., Sanchez-Azofeifa, G.A., Alvarez-Añorve, M., Stoner, K.E., Avila-Cabadilla, L., Calvo-Alvarado, J., Castillo, A., Espirito-Santo, M.M., Fagundes, M., Fernandes, G.W., GAmón, J., Lopezaraiza-Mikel, M., Lawrence, D., Cerderia Morellato, L.P., Powers, J.S., Neves, F. de S., Rosas-Guerrero, V., Sayago, R. y Sanchez-Montoya, G. (2009). Succession and management of tropical dry forests in the Americas: Review and new perspectives. *Forest Ecology and Management*, 258(6), 1014–1024.
- Raik, D., Wilson, A. y Decker, D. (2008). Power in natural resources management: an application of theory. *Society & Natural Resources*, 21(8), 729–739.
- RAN (Registro Agrario Nacional). (2016). Registro de propiedad social en el estado de Oaxaca. México D.F., México.
- Reid, R.S., Kruska, R.L., Muthui, N., Taye, A., Wotton, S., Wilson, C.J. y Mulatu, W. (2000). Land-use and land-cover dynamics in response to changes in climatic, biological and socio-political forces: the case of southwestern Ethiopia. *Landscape Ecology*, 15(4), 339-355.
- Rindfuss, R.R., Walsh, S.J., Turner, B.L., Fox, J. y Mishra, V. (2004). Developing a science of land change: Challenges and methodological issues. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 101(39), 13976–13981.
- Robbins, P. (2012). *Political Ecology: A Critical Introduction*. John Wiley y Sons. Oxfordshire, Inglaterra.
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F.S.I. y Lambin, E., Lenton, T.M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H., Nykvist, B., De Wit, D.A., Hughes, T., van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P.K., Costanza, R., Svedin, U., Falkenmark, M., Karlberg, L., Corell, R.W., Fabry, V.J., Hansen, J., Walker, B., Liverman, D., Richardson, K., Crutzen, P. y Foley, J. (2009a). Planetary Boundaries: exploring the safe operating space for humanity. *Ecology and Society*, 14(2):32.

- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F.S., Lambin, E.F., Lenton, T.M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H.J., Nykvist, B., De Wit, A., Hughes, T., van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P.K., Costanza, R., Svedin, U., Falkenmark, M., Karlberg, L., Corell, R.W., Fabry, V.J., Hansen, J., Walker, B., Liverman, D., Richardson, K., Crutzen, P. y Foley, J. (2009b). A safe operating space for humanity. *Nature*, 461, 472–475.
- Rodríguez, N.J. (2014). *Istmo de Tehuantepec: de lo Regional a la Globalización*. 2da edn. Secretaría de Asuntos Indígenas (SAI), Gobierno del estado de Oaxaca. Oaxaca, México
- Sanderson, S. (2005). Poverty and conservation: the new century's "peasantquestion?". *World Development*, 33(2), 323–332.
- Sauer, C.O. (2007). The Morphology of Landscape. En: *Foundation papers in landscape ecology* (Editores: Moss, M.R. y Turner, M.). Columbia University Press, Nueva York, EUA., pp. 36–70.
- Scheffer, M., Carpenter, S., Foley, J.A., Folke, C. y Walker, B. (2001). Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature*, 413, 591–596.
- Schmink, M. (1994). The socioeconomic matrix of deforestation. En: *Population and Environment: Rethinking the Debate* (Editores: Arizpe, L., Stone, P. y Major, D.C.). Westview Press, Colorado, EUA., pp. 253–275.
- SMN (Sistema Meteorológico Nacional). (2018). Datos climáticos diarios del CLICOM. México D.F., México.
- Soares-Filho, B., Alencar, A., Nepstad, D., Cerqueira, G., Diaz, V., del Carmen, M., Rivero, S., Solórzano, L. y Voll, E. (2004). Simulating the response of land-cover changes to road paving and governance along a major Amazon highway: the Santarém Cuiabá corridor. *Global Change Biology*, 10(5), 745–764.
- Soares-Filho, B., Cerqueira, G.C. y Pennachin, C.L. (2002). DINAMICA — a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. *Ecological Modelling*, 154(3), 217–235.
- Soares-Filho, B., Rodrigues, H. y Follador, M. (2013). A hybrid analytical-heuristic method for calibrating land-use change models. *Environmental Modelling & Software*, 43, 80–87.
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S.E., Fetzer, I. y Bennett, E.M., Biggs, R., Carpenters, S.R., Vries, W., De Wit, A., Folke, C., Gerte, D., Heinke, J., Mace, G.M., Persson, L.M., Ramanathan, V., Reyers, B. y Sörlin, S. (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, 347(6223), 736–746.
- Stewart, J.Q. (1947). Empirical mathematical rules concerning the distribution and equilibrium of population. *Geographical Review*, 37(3), 461–485.
- Stoner, K.E. y Sánchez-Azofeifa, G.A. (2009). Ecology and regeneration of tropical dry forests in the Americas: Implications for management. *Forest Ecology and Management*, 258(6), 903–906.
- Turner, B.L. y Robbins, P. (2008). Land-change science and political ecology: similarities, differences, and implications for sustainability science. *Annual Review of Environment and Resources*, 33, 295–316.
- Turner, W.R., Brandon, K., Brooks, T.M., Costanza, R., Da Fonseca, G.A. y Portela, R. (2007). Global conservation of biodiversity and ecosystem services. *BioScience*, 57(10), 868–873.
- Ullman, E. (1941). A theory of location for cities. *American Journal of Sociology*, 46(6), 853–864.

- Vásquez-Lcón, M. (1999). Neoliberalism, environmentalism, and scientific knowledge: re-defining natural resource use rights in Mexico. En: *States and Illegal Practices* (Editor: Heyman, J.). Bloomsbury Academic, Oxford, Oxfordshire, Inglaterra, pp. 233–260.
- Vásquez-León, M. y Liverman, D. (2004). The political ecology of land-use change: affluent ranchers and destitute farmers in the Mexican Municipio of Alamos. *Human Organization*, 63, 21–33.
- Veldkamp, A. y Lambin, E.F. (2001). Predicting land-use change. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 85(1-3), 1–6.
- Velthuizen, H. (2007). *Mapping biophysical factors that influence agricultural production and rural vulnerability*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma, Italia.
- von Thünen, J.H.V. (1966). *Von Thunen's isolated state: an english edition of der isolierte staat/ Johann Heinrich Von Thunen*. Pergamon. Sidney, Australia.
- Weed, D.L. (2005). Weight of evidence: a review of concept and methods. *Risk Analysis*, 25(6), 1545–1557.
- Wegener, M. (1994). Operational urban models: state of the art. *Journal of the American Planning Association*, 60(1), 17–29.
- Whiteman, G., Walker, B. y Perego, P. (2013). Planetary boundaries: ecological foundations for corporate sustainability. *Journal of Management Studies*, 50(2), 307–336.
- Wilshusen, P.R. (2003). *Negotiating devolution: community conflict, structural power, and local forest management in Quintana Roo, Mexico* (Tesis Doctoral). University of Michigan, Michigan, EUA.
- Zipf, G.K. (1949). The economy of geography. En: *Human Behavior and the Principle of Least Effort: An Introduction to Human Ecology* (Editor Zipf, G.K.). Ravenio Books, Nueva Jersey, EUA. pp. 347–415.

# Anexos

## Anexo 1

Publicación derivada de esta investigación, en ella se incluye el análisis de cambio en el uso del suelo y vegetación de los municipios de Ciudad Ixtepec, Asunción Ixtaltepec y Barrio de la Soledad en el estado de Oaxaca, y el municipio de Tepoztlán en el estado de Morelos.

### **Lands at risk: Land use/land cover change in two contrasting tropical dry regions of Mexico**

#### **Abstract**

Land use and land cover (LULC) change constitute one of the main global transformations as it is linked to processes of land degradation, loss of biodiversity and ecosystem functions, affecting predominantly tropical systems. Tropical dry forests (TDF) are particularly threatened but are also less understood and poorly represented in protected areas. Investigating LULC change and its causes is central for developing possible interventions to curb current trends of vegetation cover loss. We performed a comparative analysis of LULC change in two TDF-dominated regions located in contrasting geographical settings: the Isthmus of Tehuantepec (Oaxaca State) and the central portion of the Mexican Volcanic Belt (Tepoztlán, Morelos State). We assessed LULC change dynamics through thematic classification of mid-resolution imagery (Landsat) for each decade between 1985 and 2005, and for five-year periods between 2005 and 2015. We described multitemporal pathways of change for each cover class. In both regions, agriculture, induced pastures and human settlements grew at the expense of native forests. However, agricultural expansion emerged as the main force of change in Oaxaca, whereas urban development had an important influence in the transformations observed in Morelos. In Oaxaca, at least 5 % of agricultural surface return to secondary or primary vegetation after being used, reflecting a cyclic use of land that fosters ecological succession. In Morelos, agriculture and pastures grew at a slower pace, but a common pathway was the conversion of primary to degraded vegetation, followed by the establishment of human settlements, hindering recovery processes. Historic and

geographic differences between sites may explain the differing LULC change patterns observed. Public policies directed towards the conservation of tropical dry ecosystems should acknowledge and integrate this complexity.

**Keywords:** tropical dry forest, deforestation, agricultural expansion, urban expansion, Mexico.

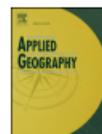
Applied Geography 99 (2018) 22–30



Contents lists available at ScienceDirect

Applied Geography

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/apgeog](http://www.elsevier.com/locate/apgeog)



## Lands at risk: Land use/land cover change in two contrasting tropical dry regions of Mexico



Leonardo Calzada<sup>a,b</sup>, Jorge A. Meave<sup>a</sup>, Consuelo Bonfil<sup>a</sup>, Fernanda Figueroa<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup> Departamento de Ecología y Recursos Naturales, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México

<sup>b</sup> Posgrado en Ciencias Biológicas, Universidad Nacional Autónoma de México

### 1. Introduction

Land use and land cover change (LULCC) processes have been widely acknowledged as one of the main global transformations, given their pace and profound ecological consequences, including habitat and biodiversity loss, climate change, and land degradation, affecting also ecosystem structural and functional integrity (Foley et al., 2005; Rockström et al., 2009; Turner et al., 2007). LULCC has accelerated dramatically in the last four decades (Metzger, Rounsevell, Acosta-Michlik, Leemans, & Schröter, 2006), turning large landscapes into heterogeneous mosaics of different land uses and vegetation cover types (Chomitz & Gray, 1996; Naveh, 1995).

Agricultural expansion is recognized as the most relevant LULCC process worldwide, as by 2000, 45% of the planet's ice-free land surface was covered by agriculture (Lambin & Meyfroidt, 2011; Ramankutty, Evan, Monfreda, & Foley, 2008). However, establishing the main underlying drivers of LULCC with precision has been elusive because, as any other socio-environmental process, it behaves as a complex non-linear system; therefore, LULCC drivers depend upon the spatio-temporal scale of analysis and vary among different socioeconomic, political and environmental contexts (Carr, Suter, & Barbieri, 2005; Lambin & Meyfroidt, 2011).

Regardless of its complexity, a meta-analysis conducted by Geist and Lambin (2002) established the existence of general proximate and underlying factors of LULCC. For example, infrastructure expansion and the growth of primary economic activities are broadly deemed as direct drivers, whereas economic, demographic, technological, political, institutional and cultural factors are regarded as indirect forces, shaping the action of proximate factors. Moreover, environmental conditions and processes, such as climate, physiography, soil and vegetation properties influence the pace, magnitude and ecological consequences of LULCC (Gasparrí & Grau, 2009; Tucker, Randolph, & Castellanos, 2007; Velthuis, 2007).

LULCC studies have paid much attention to tropical forest ecosystems, given their importance regarding extent, biodiversity, relevance

for global ecological processes, and rates of change (Balvanera, 2012; Lambin, Geist, & Lepers, 2003; Ramankutty et al., 2008). Particularly, tropical dry forests (TDF) are fragile systems, subjected to high transformation pressures, but also less investigated and protected by conservation initiatives (Espírito-Santo et al., 2009; Stoner & Sánchez-Azofeifa, 2009). TDFs are comprised by a group of community types that occur in intertropical lowlands, characterized by a well-defined dry season ranging from four to six months, total annual precipitation ranging from 500 to 1800 mm, and mean annual temperature from 18 to 26 °C (Trejo, 1996, 1998).

Vegetation types present in the seasonally dry tropical regions of Mexico include tropical dry forest, sub-tropical scrub, thorn woodland, xerophytic scrub, medium-statured tropical dry forest, gallery forest, savanna, palm grove, tropical oak grove, and tropical pine grove (Pérez-García, Meave, & Cevallos-Ferriz, 2012). Tropical forests account for nearly 5.5 % of the country's total surface, but more than half of this area is covered by TDF, representing 3.4 % of total land area (INEGI 2014). TDFs are widely distributed in the country, in areas of dry to sub-humid climates (annual rainfall 400–1,300 mm; temperature, 22–26 °C), with strong seasonality (6–8 months nearly rainless), and in the 0–2,000 m elevation range (Trejo & Dirzo, 2000). Its geographic range spans from ca. 28° N, down to the Guatemala border. On the Pacific watershed, it occurs almost continuously with major areas in western Jalisco, and in the Balsas and Santiago river basins, whereas on the Gulf of Mexico's coast, its distribution is more discontinuous (Miranda & Hernández-X. 2014; Trejo & Dirzo, 2000).

Overall, Mexican regions characterized by the presence of TDF are remarkable due to their high plant species richness, which partly responds to these systems' high beta diversity, and their high level of endemism (Gallardo-Cruz, Meave, Pérez-García, & Hernández-Stefanoni, 2010; Rzedowski, 1991). These forests provide a wide array of life-support functions, such as flood control, climate regulation, agricultural and pastoral goods, fresh water and diverse resource provisioning, soil fertility maintenance, and pollination, among others (Maass et al., 2005).

\* Corresponding author. Departamento de Ecología y Recursos Naturales, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. Circuito Exterior s/n, Ciudad Universitaria. C. P. 04510, Delegación Coyoacán, Ciudad de México, Mexico.

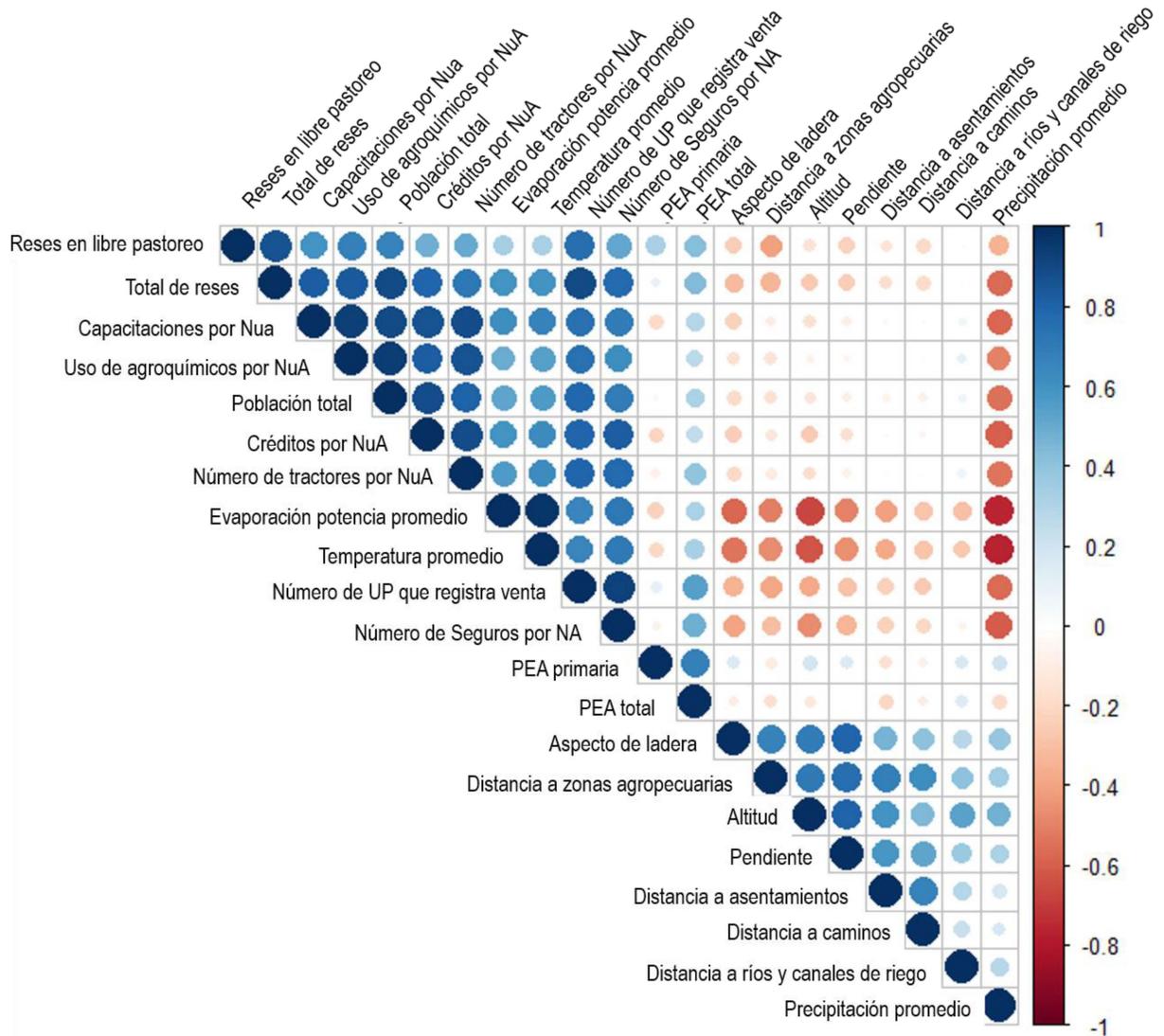
E-mail addresses: [lcalzada@ciencias.unam.mx](mailto:lcalzada@ciencias.unam.mx) (L. Calzada), [jorge.meave@ciencias.unam.mx](mailto:jorge.meave@ciencias.unam.mx) (J.A. Meave), [cbonfil@ciencias.unam.mx](mailto:cbonfil@ciencias.unam.mx) (C. Bonfil), [ffigueroa@ciencias.unam.mx](mailto:ffigueroa@ciencias.unam.mx) (F. Figueroa).

<https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2018.07.021>

Received 16 March 2018; Received in revised form 23 July 2018; Accepted 24 July 2018  
0143-6228/ © 2018 Elsevier Ltd. All rights reserved.

## Anexo 2

Correlograma de Spearman entre factores cuantitativos del cambio en el uso del suelo y la vegetación. Nua: Núcleo Agrario.



## Anexo 3

Cuadro de modelos suplementarios empleados para la selección de variables explicativas en el análisis de cambio de uso de suelo y vegetación.

Modelo cuantitativo para abordar el CUSV	Estudios de caso	Implicaciones para el desarrollo del estudio
<p>Particionamiento jerárquico</p>	<p>El modelo de particiones jerárquicas indica cual es el efecto independiente (I) y conjunto (C) de cada una de las variables explicativas sobre los procesos de cambio en el uso del suelo. Esto último puede ser entendido como un ordenamiento de variables conforme a su importancia sobre determinadas transiciones.</p>	<p>Procesos de abandono y apertura de parcelas agrícolas (Baumann et al.2011). Análisis de factores relevantes para el CUSV en zonas caracterizadas por bosques templados (Kolb <i>et al.</i> 2013)</p> <p>A pesar de que el método es especialmente funcional para evitar errores producto de la colinealidad de variables, éste no indica si la variable es o no significativamente importante para explicar el CUSV por lo que simplemente jerarquiza, pero no filtra los factores explicativos. Así mismo, el método tiene un error de redondeo en los índices I y C cuando maneja más de 12 variables explicativas.</p>
<p>Regresión múltiple por cuadrados parciales</p>	<p>La regresión múltiple por cuadrados parciales (RPP) es un tipo especial de regresión lineal múltiple, es especialmente útil para manejar variables colineales, conjuntos de datos con bajo número de observaciones o con grupos de variables en distintas unidades. La RPP establece relaciones entre variables predictivas y variables respuesta al ponderar el efecto que tiene cada variable independiente sobre la variable dependiente. La nueva variable obtenida por la multiplicación entre los valores de cada variable independiente (<math>X_i</math>) y su factor de ponderación se conoce como variable latente.</p>	<p>Análisis de factores socioeconómicos y biofísicos sobre el cambio de uso de suelo y la vegetación (Li et al. 2016).</p> <p>Si bien el método ha ganado popularidad en áreas como la ecología del paisaje y los estudios de la geografía física, la aplicación de las RPP requiere la normal distribución de las variables, maneja de mejor manera variables discretas y continuas en comparación con las nominales u ordinales.</p>

	Modelo cuantitativo para abordar el CUSV	Estudios de caso	Implicaciones para el desarrollo del estudio
Modelos de ecuaciones estructurales	<p>Los modelos de ecuaciones estructurales (MES) fueron utilizados inicialmente en campos como la psicología y las ciencias sociales. Sin embargo, áreas como la ecología cuantitativa y del paisaje han comenzado a utilizarlos en la última década. Los MES son una herramienta efectiva para modelar redes complejas de relaciones multivariadas, además el enfoque de variables latentes* permite evaluar el efecto de variables compuestas (interacción de al menos dos variables para formar una tercera) o variables que son imposibles de medir o no poseen una escala o unidad. Finalmente, permite representar gráficamente la importancia de cada variable o la presencia de procesos antagónicos o sinérgicos en un fenómeno determinado.</p>	<p>Análisis de la variación espacial en factores relevantes para la evaluación de la efectividad de trabajos de restauración ambiental (Comber et al. 2017). Análisis del efecto de la heterogeneidad ambiental sobre procesos sucesionales en áreas incendiadas (Grace y Keeley, 2006)</p>	<p>Aunque los SEM son capaces de manejar redes complejas de integración entre factores y una variable respuesta, la mayoría de ellos sigue estableciendo las relaciones a través de regresiones, lo que dificulta la incorporación de la autocorrelación espacial y temporal. Adicionalmente el uso de variables latentes dificulta la selección de las variables explicativas con mayor poder predictivo a pesar de la colinealidad.</p>
Análisis de componentes principales	<p>La detección de cambios basada en análisis de componentes principales fue una de las primeras técnicas empleadas para la detección de cambios de uso de suelo debido a su simplicidad y poder explicativo (Lu et al. 2004). La idea central de este método es reducir la dimensionalidad de un conjunto de datos provenientes de múltiples variables explicativas interrelacionadas, todo esto manteniendo la mayor cantidad de variación presente. El método consiste en obtener un nuevo conjunto de variables independientes (componentes) basado en los eigen-vectores de la matriz de datos.</p>	<p>Detección de cambios en el uso del suelo basado en ACP empleando imágenes multisensor (Deng et al. 2008).</p>	<p>El ACP fue probado para reducir la dimensionalidad de variables en el presente estudio; no obstante, éste generó componentes que no reflejaba directamente el efecto que tienen las diferentes variables explicativas sobre el fenómeno. Lo anterior dificultaba la posterior modelación con el algoritmo de autómatas celulares.</p>

## Anexo 4

Cuadro de coeficientes de regresión obtenidos por los mejores cinco modelos lineales generalizados de efectos mixtos.

	Coeficientes de regresión				
	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 5
Suelo de tipo A0+Nd/3	-0.259*** (-0.310, -0.208)	-0.259*** (-0.310, -0.208)	-0.258*** (-0.309, -0.207)	-0.259*** (-0.310, -0.208)	-0.259*** (-0.310, -0.208)
Suelo de tipo Rd+Ah+I/2/L	-1.367*** (-1.575, -1.159)	-1.367*** (-1.575, -1.159)	-1.366*** (-1.574, -1.159)	-1.367*** (-1.575, -1.159)	-1.367*** (-1.575, -1.159)
Suelo de tipo Re+Ao+Bc/2/L	-0.410*** (-0.434, -0.385)				
Suelo de tipo I+Re/2	0.124*** (0.108, 0.139)				
Suelo de tipo Be+I+Ao/2/L	-0.721*** (-0.777, -0.665)	-0.721*** (-0.777, -0.665)	-0.721*** (-0.777, -0.664)	-0.721*** (-0.777, -0.665)	-0.721*** (-0.777, -0.665)
Suelo de tipo I+Hh/2	0.125*** (0.103, 0.147)				
Suelo de tipo Bc+Lc/2/L	0.085*** (0.054, 0.116)	0.085*** (0.054, 0.116)	0.085*** (0.054, 0.116)	0.085*** (0.054, 0.115)	0.085*** (0.054, 0.115)
Suelo de tipo Be+Bc/2	-0.756*** (-0.790, -0.721)	-0.756*** (-0.790, -0.721)	-0.755*** (-0.790, -0.721)	-0.756*** (-0.790, -0.721)	-0.756*** (-0.790, -0.721)
Suelo de tipo Vp+Hh/3	0.214*** (0.180, 0.248)	0.214*** (0.180, 0.248)	0.214*** (0.181, 0.248)	0.214*** (0.180, 0.248)	0.214*** (0.180, 0.248)
Suelo de tipo Vc/3	-0.564*** (-0.598, -0.530)	-0.564*** (-0.598, -0.530)	-0.564*** (-0.598, -0.529)	-0.564*** (-0.598, -0.530)	-0.564*** (-0.598, -0.530)
Suelo de tipo Vp/3	-0.296*** (-0.330, -0.262)				
Rocas areniscas y conglomerados	-0.249*** (-0.282, -0.215)				
Rocas calizas	-0.045***	-0.045***	-0.045***	-0.045***	-0.045***

	Coeficientes de regresión				
	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 5
	(-0.074, -0.016)	(-0.074, -0.016)	(-0.074, -0.016)	(-0.074, -0.016)	(-0.074, -0.016)
Rocas metamórficas	-0.771 <sup>***</sup>	-0.771 <sup>***</sup>	-0.771 <sup>***</sup>	-0.771 <sup>***</sup>	-0.771 <sup>***</sup>
	(-0.798, -0.744)	(-0.798, -0.744)	(-0.798, -0.744)	(-0.798, -0.744)	(-0.798, -0.744)
Rocas ígneas extrusivas	-0.205 <sup>**</sup>	-0.205 <sup>**</sup>	-0.205 <sup>**</sup>	-0.205 <sup>**</sup>	-0.205 <sup>**</sup>
	(-0.228, -0.181)	(-0.228, -0.181)	(-0.228, -0.181)	(-0.228, -0.181)	(-0.228, -0.181)
Sedimentos de reciente formación	-0.209 <sup>**</sup>	-0.209 <sup>**</sup>	-0.209 <sup>**</sup>	-0.209 <sup>**</sup>	-0.209 <sup>**</sup>
	(-0.219, -0.200)	(-0.219, -0.200)	(-0.219, -0.200)	(-0.219, -0.200)	(-0.219, -0.200)
Zonas designadas como uso común	0.553 <sup>***</sup>	0.553 <sup>***</sup>	0.553 <sup>***</sup>	0.553 <sup>***</sup>	0.553 <sup>***</sup>
	(0.540, 0.565)	(0.540, 0.565)	(0.540, 0.565)	(0.540, 0.565)	(0.540, 0.565)
Zonas designadas como parcelas de producción	0.604 <sup>***</sup>	0.604 <sup>***</sup>	0.605 <sup>***</sup>	0.604 <sup>***</sup>	0.604 <sup>***</sup>
	(0.585, 0.623)	(0.585, 0.623)	(0.586, 0.624)	(0.585, 0.623)	(0.585, 0.623)
Distancia a zonas agrícolas y pecuarias	-1.998 <sup>***</sup>	-1.998 <sup>***</sup>	-1.998 <sup>***</sup>	-1.998 <sup>***</sup>	-1.998 <sup>***</sup>
	(-2.015, -1.981)	(-2.015, -1.981)	(-2.016, -1.981)	(-2.015, -1.981)	(-2.015, -1.981)
Distancia a asentamientos humanos	-0.223 <sup>***</sup>	-0.223 <sup>***</sup>	-0.223 <sup>***</sup>	-0.223 <sup>***</sup>	-0.223 <sup>***</sup>
	(-0.230, -0.216)	(-0.230, -0.216)	(-0.230, -0.216)	(-0.230, -0.216)	(-0.230, -0.216)
Distancia a ríos o canales	-0.081 <sup>***</sup>	-0.081 <sup>***</sup>	-0.081 <sup>***</sup>	-0.081 <sup>***</sup>	-0.081 <sup>***</sup>
	(-0.085, -0.077)	(-0.085, -0.077)	(-0.085, -0.077)	(-0.085, -0.077)	(-0.085, -0.077)
Distancia a caminos	0.178 <sup>***</sup>	0.178 <sup>***</sup>	0.178 <sup>***</sup>	0.178 <sup>***</sup>	0.178 <sup>***</sup>
	(0.172, 0.185)	(0.172, 0.185)	(0.172, 0.185)	(0.172, 0.185)	(0.172, 0.185)
Aspecto de ladera	0.228 <sup>***</sup>	0.228 <sup>***</sup>	0.228 <sup>***</sup>	0.228 <sup>***</sup>	0.228 <sup>***</sup>
	(0.223, 0.233)	(0.223, 0.233)	(0.223, 0.233)	(0.223, 0.233)	(0.223, 0.233)
Altitud	-0.413 <sup>***</sup>	-0.413 <sup>***</sup>	-0.413 <sup>***</sup>	-0.413 <sup>***</sup>	-0.413 <sup>***</sup>
	(-0.430, -0.396)	(-0.430, -0.396)	(-0.430, -0.396)	(-0.430, -0.396)	(-0.430, -0.396)
Pendiente	-0.324 <sup>***</sup>	-0.324 <sup>***</sup>	-0.324 <sup>***</sup>	-0.324 <sup>***</sup>	-0.324 <sup>***</sup>

	Coeficientes de regresión				
	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 5
	(-0.335, -0.313)	(-0.335, -0.313)	(-0.335, -0.313)	(-0.335, -0.313)	(-0.335, -0.313)
Promedio de precipitación anual	0.084 <sup>***</sup>	0.084 <sup>***</sup>	0.084 <sup>***</sup>	0.084 <sup>***</sup>	0.084 <sup>***</sup>
	(0.080, 0.088)	(0.080, 0.088)	(0.080, 0.088)	(0.080, 0.088)	(0.080, 0.088)
Promedio de la evaporación potencial anual	-0.157 <sup>**</sup>	-0.157 <sup>**</sup>	-0.157 <sup>**</sup>	-0.157 <sup>**</sup>	-0.157 <sup>**</sup>
	(-0.185, -0.129)	(-0.185, -0.129)	(-0.185, -0.130)	(-0.185, -0.129)	(-0.185, -0.129)
Promedio de la temperatura anual	-0.025 <sup>**</sup>	-0.025 <sup>**</sup>	-0.025 <sup>**</sup>	-0.025 <sup>**</sup>	-0.025 <sup>**</sup>
	(-0.048, -0.003)	(-0.048, -0.003)	(-0.048, -0.003)	(-0.048, -0.003)	(-0.048, -0.003)
Cantidad de UP que recibieron créditos		1.228 <sup>***</sup>			1.227 <sup>***</sup>
		(1.174, 1.282)			(1.173, 1.281)
Cantidad de UP que venden parte de la producción	0.688 <sup>*</sup>		0.651	4.342 <sup>***</sup>	
	(-0.100, 1.477)	(-0.138, 1.441)	(2.243, 6.442)		
Cantidad de UP que usan agroquímicos	2.332 <sup>***</sup>	2.446 <sup>***</sup>		2.390 <sup>***</sup>	2.499 <sup>***</sup>
	(1.328, 3.336)	(1.443, 3.448)		(1.362, 3.417)	(1.470, 3.527)
Cantidad de UP que recibieron capacitaciones	-1.902 <sup>**</sup>	-1.921 <sup>**</sup>		-1.720 <sup>**</sup>	-1.730 <sup>**</sup>
	(-3.534, -0.270)	(-3.557, -0.286)		(-3.354, -0.085)	(-3.378, -0.083)
Cantidad de UP aseguradas			-3.311 <sup>***</sup>	0.484	0.433
			(-5.230, -1.393)	(-0.208, 1.176)	(-0.264, 1.130)
Cabezas de ganado en libre pastoreo			-3.673 <sup>***</sup>		
			(-4.366, -2.980)		
Cabezas de ganado totales	-1.974 <sup>**</sup>	-1.820 <sup>**</sup>	3.843 <sup>***</sup>	-1.972 <sup>***</sup>	-1.819 <sup>**</sup>
	(-2.071, -1.877)	(-1.911, -1.729)	(2.215, 5.471)	(-2.070, -1.875)	(-1.910, -1.728)
Proporción de la PEA dedicada al sector primario	0.859 <sup>***</sup>	0.853 <sup>***</sup>	2.542 <sup>***</sup>	0.858 <sup>***</sup>	0.853 <sup>***</sup>

	Coeficientes de regresión				
	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 5
	(0.825, 0.892)	(0.820, 0.887)	(1.294, 3.789)	(0.825, 0.892)	(0.819, 0.886)
Población total	1.377 <sup>***</sup>			1.375 <sup>***</sup>	
	(1.316, 1.437)			(1.315, 1.436)	
PEA			-2.166 <sup>***</sup>		
			(-3.799, -0.533)		
Constante	5.892 <sup>***</sup>	5.905 <sup>***</sup>	5.957 <sup>***</sup>	5.933 <sup>***</sup>	5.945 <sup>***</sup>
	(4.982, 6.802)	(4.991, 6.819)	(5.242, 6.673)	(4.994, 6.872)	(4.998, 6.892)
Observaciones	399	399	399	399	399
Log Verosimilitud	-116,398.10	-116,398.20	-116,398.40	-116,398.60	-116,398.70
Criterio de inf. Bayesiano	233,011.90	233,011.90	233,012.50	233,012.80	233,012.90

Notas:

\*p<0.1; \*\*p<0.05; \*\*\*p<0.01

Unidades de Producción (UP)

En la variable tipo de suelo se muestra únicamente la clave edafológica las equivalencias pueden consultarse en INEGI (2014).

## Agradecimientos personales

A los “Paruelitos” por ser mis guías espirituales durante mi estancia en Buenos Aires. Como esas mañanas de mate con Cami y Flor, esos viajes relámpago con María y esas sorprendentes birras con Dany, Goza, Hernán y Bruno.

A mi pandilla de la facultad de ciencias, por el torrente de anécdotas e historia que atesoro, Los quiero chicos, se los digo en cada oportunidad que se me cruza. Hago hincapié en los “Viernes” por esos planes atravesados que tanto sazón le dan a mi semana

A Rodrigo y Tetsu, mis hermanos por elección, por los viajes, vivencias y proyectos (algunos en el tintero aún), que la vida se encargó de juntarnos.

A mi familia, por hacerme lo que soy (¡sí!, gritón y todo).

A Fernanda, mi gurú académica, que me lleva por la senda de la crítica, el descubrimiento y el amor a la ciencia (a veces a periodicosos).

A mis cotripulantes en el grupo de Análisis sociambiental, por esas amenas tardes de trabajo y la más bella tradición del mundo: *los lunes de vino*.

A Bárbara que como habitante de Andria me ha mostrado la importancia de tres virtudes: la empatía, la seguridad en uno mismo y la prudencia. Toda en nuestra vida influirá en el dibujo del cielo.

*Es tan difícil a veces decir las cosas o escribirlas, o tan fácil, sin alcanzar de cualquier manera lo que se siente.* Con estas palabras de Helguera quiero decirles que a pesar de mi falta de elocuencia lo que siento por ustedes es inconmensurable.