



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

APLICACIÓN DE UN MODELO ESPACIAL PARA LA
ELABORACIÓN DE ESCENARIOS DE USO/COBERTURA
DEL SUELO EN LA HUACANA, MICHOACÁN

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE
MAESTRA EN GEOGRAFÍA
ORIENTACIÓN DE GEOGRAFÍA AMBIENTAL
P R E S E N T A :
GABRIELA CUEVAS GARCÍA

DIRECTOR DE TESIS: DR. JEAN FRANCOIS MAS CAUSSEL



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.

**a mis padres,
Arturo y Martha**

Agradecimientos

Deseo manifestar mi agradecimiento a las siguientes personas e instituciones, quienes fueron de gran ayuda durante la realización de mi tesis:

Al CONACYT por la beca que me otorgó durante mis estudios de maestría y por la beca del proyecto “Sistema de monitoreo de la deforestación en México” con clave de registro 47198 la cual me permitió terminar la tesis. A la Dirección General de Posgrado de la UNAM y al Internacional Institute for Geoinformation and Earth Observation (ITC, Enschede, Países Bajos) por el apoyo para la estancia que realicé en Holanda.

Al Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, UNAM, Campus Morelia, por permitirme hacer uso de sus instalaciones durante el desarrollo de este proyecto.

Al Dr. Jean Francois Mas, asesor del presente trabajo por compartir sus conocimientos, su dedicación y guía.

A los revisores de esta tesis: Dra. Isabel Ramírez, Dr. Narciso Barrera, Dr. Alejandro Velásquez y el Mtro. Luis Miguel Morales, cuyos valiosos comentarios permitieron mejorar este trabajo.

Al Dr. Gerardo Bocco por su apoyo e impulso para que estudiara la maestría.

A la Dra. Ana Burgos por el interés en el proyecto, la información y sus muy oportunas sugerencias.

Al Dr. Francisco Bautista, Rosura Paez y Estela Carmona por la información climatológica.

A Janik Granados y Carlos Troche por el apoyo brindado en el trabajo de campo.

A Consuelo Medina y Azucena Pérez quienes aportaron referencias, datos y comentarios que fueron muy útiles en el proceso de este trabajo.

A José Antonio Navarrete por el apoyo técnico.

A Katya Méndez por su apoyo en los asuntos administrativos.

De manera muy especial agradezco al Gobierno Municipal de La Huacana 2005-2007, especialmente al Biól. Mario Romero (Presiente Municipal), por su apoyo para la realización del trabajo de campo, y el tiempo concedido para las entrevistas. Al Ing. Jorge Luis González por la revisión de los mapas y el apoyo en las visitas a La Huacana, a Luz del Carmen Almaguer, Ruth Cisneros, Pedro Chávez y Dionisio Villegas, a todos ellos por su apoyo en los recorridos de campo y apoyo en la organización del Taller. Finalmente agradezco a la Asamblea del Consejo de Desarrollo Rural por su colaboración e información vertida en el Taller, la cual fue fundamental en el desarrollo de la tesis.

Índice

1. Introducción
 2. Área de estudio y materiales
 - 2.1. Área de estudio
 - 2.2 Materiales
 3. Metodología
 - 3.1 Técnicas de investigación de campo
 - 3.1.1 Muestreo de uso/cobertura del suelo
 - 3.1.2 Conocimiento local
 - 3.2 Procesamiento de Datos
 - 3.2.1. Clasificación de usos/coberturas del suelo
 - 3.2.2 Tasas de cambio
 - 3.3 Aplicación de DINAMICA
 - 3.3.1 Autómata celular en DINAMICA
 - 3.3.2 Probabilidades de transición espacial
 - 3.3.3 Calibración del modelo
 - 3.4 Escenarios
 - 3.5 Integración del conocimiento local
 - 3.6 Validación
 4. Resultados
 - 4.1 Datos derivados del trabajo de campo
 - 4.1.1 Muestras de uso/cobertura del suelo
 - 4.1.2 Sistematización del conocimiento local
 - 4.3 Desempeño del modelo
 - 4.3.1 Transiciones que implican degradación
 - 4.3.2 Transiciones que implican recuperación
 5. Validación y discusión de resultados
 6. Conclusión y perspectivas
- Bibliografía

Resumen

El objetivo de este trabajo fue aplicar un modelo de cambio de uso/cobertura del suelo a una región tropical seca (escasamente modelada a diferencia de otros ambientes) que aporte elementos para comprender la dinámica del cambio del uso del suelo y, derivar escenarios de las posibles trayectorias futuras de dicho cambio, los cuales pueden ser una herramienta muy útil para la toma de decisiones por parte de las autoridades y la comunidad, en torno al uso de sus recursos.

El área de estudio es La Huacana, municipio del estado de Michoacán, donde la principal cobertura del suelo es la Selva Baja Caducifolia. El municipio tiene una alta tasa de migración que promueve el abandono de tierras de cultivo, debido principalmente a la baja producción agrícola. Al mismo tiempo, pequeños propietarios convierten de manera acelerada el bosque en pastizales. Todos estos procesos han causado degradación ambiental y agravan la carencia de agua, que es uno de los problemas más severos en la región.

Se clasificaron imágenes Landsat y ASTER de los años 2000, 2003 y 2006 para generar mapas de uso/cobertura del suelo del municipio. Posteriormente, se modelaron los cambios de uso/cobertura utilizando DINAMICA, un software de modelización especializado en los cambios de cobertura del suelo. La selección de las variables que explican las transiciones de uso/cobertura del suelo fueron determinadas usando la información obtenida en un taller realizado en el Consejo Municipal de Desarrollo Rural de La Huacana.

El mapa de uso/cobertura del suelo simulado para 2006 y obtenido por el modelo calibrado en el periodo 2000-2003, fue comparado con el mapa derivado del análisis de las imágenes ASTER de 2006. Dicha comparación mostró un desempeño razonable del modelo (cerca del 50%). En un paso siguiente, se corrió el modelo con tres escenarios para el año 2015 que abarcan una gama de posibles trayectorias futuras de deforestación. El primer escenario llamado “tendencial”, asume que las tendencias de deforestación observadas en 2000-2003 seguirán, el segundo escenario denominado “ganadero” supone que las

tasas de deforestación aumentarán a causa del incremento de pastizales y finalmente el tercero o "deseable" estima que la deforestación relacionada con la ganadería disminuirá, debido a que se implementarán prácticas de manejo, además de que las comunidades implementarán áreas naturales protegidas.

La perspectiva de los habitantes y de las autoridades locales fue útil para conceptualizar el modelo. Por otro lado, la presentación de los diferentes escenarios a la comunidad y a las autoridades municipales podría ser un instrumento valioso para la toma de decisiones y la sensibilización sobre la necesidad de establecer estrategias de protección de sus recursos naturales locales y municipales.

1. Introducción

Actualmente, la investigación sobre el cambio de uso del suelo ha madurado en términos teóricos, metodológicos e instrumentales. Además, la investigación interdisciplinaria está ganando importancia en este campo disciplinar; los estudios tienen una aproximación más holística que en el pasado y se está promoviendo la colaboración científica transdisciplinaria (Briassoulis 2000).

Las modalidades de estudios de cambio de uso del suelo difieren dependiendo de los objetivos que se persiguen. En términos generales, existen dos aproximaciones principales que se pueden distinguir.

En primer término están los estudios orientados al monitoreo del cambio de uso del suelo, tales como la medición de la conversión. A pesar de la naturaleza descriptiva de estos estudios, son esenciales y muchas veces son el insumo de estudios más elaborados. Actualmente los cambios de uso de suelo son detectados principalmente a través de imágenes de satélite y se han diseñado múltiples técnicas para ser aplicadas en este campo. Sin embargo, no existe una aplicación óptima que pueda ser aplicada a todos los casos y continúan desarrollándose nuevas técnicas para el uso efectivo de datos de sensores remotos, técnicas que son cada vez más diversas y complejas (Lu *et al.* 2004);

Por otra parte encontramos los estudios explicativos, los cuales pretenden entender los mecanismos que actúan en el cambio de uso del suelo y, en particular, conocer las fuerzas y los factores que promueven tales cambios. Un marco para entender las causas del cambio de uso/cobertura del suelo es el de las “causas próximas” y las “fuerzas conducentes”. En este marco, las causas próximas se refieren a las actividades que directamente afectan el uso del suelo, mientras que las fuerzas conducentes indican los procesos sociales subyacentes que dan lugar a las acciones próximas que afectan el cambio de uso/cobertura del suelo (Chowdhury 2006).

Las “causas próximas” pueden agruparse en tres grandes categorías: i) expansión de cultivos y pastizales, ii) extracción de madera, y iii) expansión de

infraestructura. Todos ellos operan a nivel local. Por otra parte, las “fuerzas conductoras” pueden agruparse en cinco categorías: i) demográficos, ii) económicos, iii) tecnológicos, iv) políticos e institucionales; y v) un complejo de factores socio-políticos o culturales. Estos factores operan a nivel local, o indirectamente a nivel nacional o incluso global (Geist y Lambin 2001).

Dentro de esta tendencia de estudios explicativos se encuentran los modelos de simulación de la dinámica del cambio de uso/cobertura del suelo, haciendo predicciones de cambios futuros bajo diversos escenarios hipotéticos.

El objetivo de este trabajo es aplicar un modelo de cambio de uso/cobertura del suelo a una región tropical seca (escasamente modelada a diferencia de otros ambientes) que aporte elementos para comprender la dinámica del cambio del uso del suelo y, derivar escenarios de las posibles trayectorias futuras de dicho cambio, los cuales pueden ser una herramienta muy útil para la toma de decisiones por parte de las autoridades y la comunidad, en torno al uso de sus recursos.

El dotar a la comunidad con mapas realistas de cómo cambia su entorno (paisaje) puede ayudar a mejorar la comunicación (Stock *et al.* 2007), además de servir para alertar sobre las implicaciones que los cambios de uso/cobertura del suelo pueden traer consigo y, de esta manera, promover cambios en el comportamiento a nivel individual y social (Sheppard 2005). En otras palabras, la construcción de escenarios intenta mostrar alternativas futuras informadas que tienen la intención de influir en la toma de decisiones (Chermack 2007).

El área de estudio es La Huacana, municipio del estado de Michoacán, donde la principal cobertura del suelo es la Selva Baja Caducifolia (SBC), tipo de vegetación fuertemente amenazado. La elección de esta área, además del interés en probar el modelo en un ambiente seco, se debe a la coyuntura derivada del interés de las autoridades municipales (2005-2007) en contar con información que apoye su gestión en aras de un desarrollo municipal ambientalmente viable.

El periodo para el cual se calibró el modelo es de 2000 a 2003, y se validó para el año 2006. El haber trabajado en un periodo corto y reciente tiene la ventaja de

involucrar cambios derivados de una situación muy concreta y actual, con fuertes posibilidades de que esa dinámica sea la que rija en el futuro inmediato, y de esa forma, el modelo sea más realista. No obstante, también existen limitaciones derivadas de que el periodo sea corto, como el que algunos procesos de cambio no se vean reflejados en este periodo de tiempo; o que los cambios reportados son pocos y, por lo tanto, su caracterización espacial puede estar sesgada. Finalmente, cabe mencionar que la elección del periodo estudiado también estuvo condicionado por la disponibilidad de las imágenes de satélite, principal insumo del modelo.

La herramienta utilizada para llevar a cabo la simulación del cambio de uso/cobertura del suelo, es DINAMICA (Soares-Filho *et al.* 2002), software desarrollado en la Universidad Federal de Minas Gerais, Brasil. Se trata de un software heurístico útil para probar hipótesis sobre la dinámica del paisaje y que ha probado su buen desempeño en estudios de la dinámica urbana (Almeida *et al.* 2003; Almeida *et al.* 2005) y de la deforestación tropical (Soares-Filho *et al.* 2002; Soares-Filho *et al.* 2004).

Con base en la clasificación de los modelos de cambio de uso del suelo propuesta por Briassoulis (2000), DINAMICA es parte de los modelos integrados, los cuales consideran las interacciones, relaciones y vínculos entre dos o más componentes del sistema espacial y los relaciona con el uso del suelo y sus cambios, ya sea de manera directa o indirecta. A su vez los modelos integrados se agrupan en econométricos, interacción gravitacional-espacial, simulación y entrada-salida. DINAMICA es un modelo de simulación que involucra una serie de reglas, las cuales generalmente no pueden ser escritas como ecuaciones algebraicas y en su lugar hace uso de la probabilidad condicional. Estos métodos se utilizan para simular el comportamiento de sistemas complejos que no permiten el uso de aproximaciones analíticas más directas.

De acuerdo al nivel espacial de análisis, los modelos de simulación pueden ser locales (urbanos o rurales), regionales o globales. DINAMICA es un modelo regional, de los cuales han proliferado una gran diversidad como respuesta al

interés en el papel crítico del uso del suelo y su cambio en el desencadenamiento de cambios medioambientales a gran escala.

Finalmente y, dada la diversidad de modelos de simulación regionales, Briassoulis (2000) los clasifica en: 1) el marco CLUE (Conversion of Land Use Change and its Effects), 2) Autómatas celulares, 3) el modelo del IIASA (International Institute for Applied Systems Analysis), y 4) el modelo IMPEL (Integrated Model to Predict European Land use). DINAMICA es un modelo que emplea un autómata celular y, de acuerdo con White y Engelen (2000), se trata de una aproximación muy atractiva ya que es inherentemente espacial, dinámica y altamente adaptable, que puede representar patrones complejos a través de reglas simples.

2. Área de estudio y materiales

2.1. Área de estudio

El municipio de La Huacana tiene un área de 1 940 km² y está localizado en el suroeste del Estado de Michoacán, México, entre las coordenadas 18° 13' y 19° 04' norte; y 102° 13' y 101°36' oeste, como se muestra en la figura 1. La elevación varía desde 160 m, en la margen de la presa Infiernillo, hasta los 2 060 m, en el límite noreste del municipio.

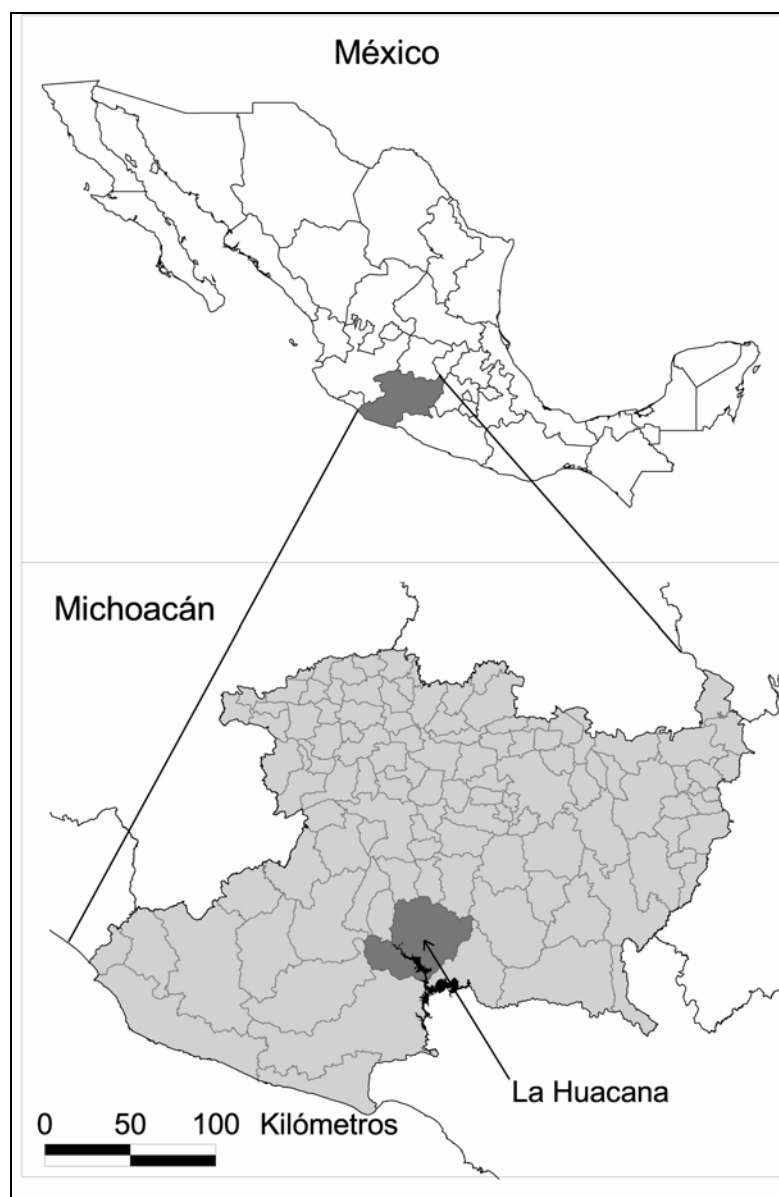


Figura 1 – El Estado de Michoacán y el municipio de La Huacana

El municipio se encuentra en el trópico seco mexicano, donde la cobertura dominante es la SBC. Este tipo de vegetación tiene una amplia distribución en México (Burgos y Maass 2004), pero ha sido poco valorado e insuficientemente estudiado y modelado, debido a las dificultades analíticas y técnicas para su estudio; dificultades que en parte se derivan de los bruscos cambios estacionales que se reflejan en la pérdida del follaje durante seis u ocho meses del año (Rzedowski 1986; Arroyo-Mora *et al.* 2005).

La variación en la disponibilidad de la humedad es un elemento básico en el comportamiento del dosel, por ello es importante considerar, además de la distribución estacional de las lluvias, la alta variación de la precipitación año tras año, dado que la mayoría de las áreas con este tipo de vegetación tienen apenas alrededor de un 46% de probabilidad de que la lluvia de un año sea la promedio del lugar (Trejo 1998). Otro aspecto relacionado con la irregularidad de la precipitación es el que se refiere a los eventos atípicos interanuales que tienen que ver con la tardanza en la llegada de las lluvias o la presencia de éstas en meses donde de manera regular no son esperadas (Mass *et al.* 1995). En la figura 2 se presenta un climograma de la estación Zirizícuaru (Bautista *et al.* 2008) como ejemplo del comportamiento estacional de la precipitación y su relación con la evapotranspiración potencial (ETp). Los datos corresponden al periodo 1971-2000.

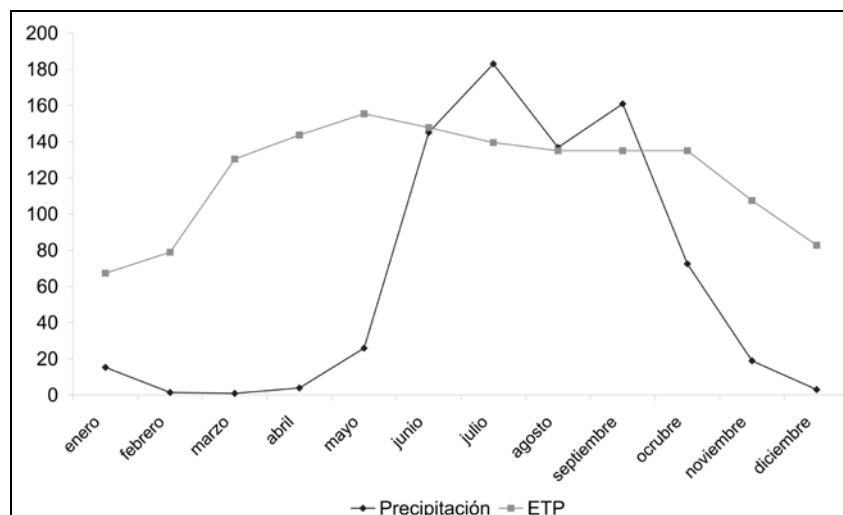


Figura 2 Climograma de la estación Zirizícuaru

Los elementos dominantes de la SBC son los árboles de copas extendidas y de estatura baja (8m en promedio), mientras que los arbustos son un elemento importante en la composición de su estructura. La cantidad de lianas aumenta en áreas más húmedas y, en las más secas hay presencia de cactáceas columnares y candelabrifformes (Trejo 1998).

El trópico seco está considerado entre los ecosistemas con mayor nivel de biodiversidad y alberga un considerable número de endemismos. A la vez se reconoce entre los ecosistemas más vulnerables al cambio, ya que frente al disturbio intenso tiende a perder su identidad y se limita la regeneración de la SBC original (Trejo y Dirzo 2000). A nivel nacional, la degradación y conversión de estas selvas ha sido muy grande y sólo pequeñas áreas permanecen intactas. Según estimaciones citadas por Trejo (1998) su extensión se redujo del 14% al 8% del territorio nacional.

Actualmente son pocas las Áreas Naturales Protegidas decretadas que protejan la biodiversidad de este tipo de vegetación en México, y una de ellas es la recientemente decretada (DOF 30 de noviembre de 2007) en Infiernillo-Zicuirán, y que incluye una parte importante del municipio estudiado.

La temperatura de La Huacana varía dependiendo de la elevación, las partes bajas (menores a 800m) son las más cálidas con una temperatura promedio anual de 26° C, esta zona es parte de la llamada "Tierra Caliente". De ahí la temperatura decrece 4° C por cada 1 000m de elevación (Vidal 2005). En la región, la precipitación anual es menor de 600mm, con algunas variaciones derivadas de la elevación y la temperatura.

En el año 2000, el municipio de La Huacana contaba con 34 245 habitantes distribuidos en 118 asentamientos, de los cuales sólo dos son considerados como urbanos y los 116 restantes como rurales (con menos de 2 500 habitantes) (INEGI 2001). Para 2005 se reporta una disminución de la población de 2 471 habitantes (INEGI 2006), tendencia que comparte con otros 85 municipios del estado y que es atribuible tanto a la migración hacia los EUA como a la migración interna.

Los dos tipos de tenencia de la tierra son la propiedad privada y los ejidos (régimen de propiedad social). Cada ejido tiene un representante (comisario ejidal). Los comisarios de todos los ejidos se reúnen mensualmente en el Consejo Municipal de Desarrollo Rural (COMUDER), en la cual son abordados temas de interés común.

De acuerdo al índice de marginación elaborado por el Consejo Nacional de Población (CONAPO 2001), para el año 2000 de las 118 localidades del municipio, 57 se clasificaron con muy alto grado de marginación, 60 en grado alto y sólo dos en grado medio. En 2005 se observa una disminución del grado de marginación, ya que 28 de las localidades con muy alto grado de marginación pasan a grado alto y 8 de grado alto pasan a grado medio (CONAPO 2006). Este índice está basado en indicadores que muestran la disponibilidad de los principales servicios tales como agua entubada, drenaje, electricidad, número de habitantes por vivienda, grado de escolaridad y la proporción de analfabetismo.

En México, la migración internacional, especialmente hacia Estados Unidos de Norteamérica se ha incrementado dramáticamente en las décadas pasadas e involucra principalmente a campesinos de pequeños pueblos rurales que viajan frecuentemente impulsados ante la falta de empleos y los bajos salarios, entre otras causas. Como resultado de la migración, se observa el abandono de tierras de cultivo, especialmente en tierras marginales y poco productivas, las cuales han disparado una tendencia importante de cambio de uso del suelo/cobertura en áreas como La Huacana y, este proceso parece facilitar la recuperación del ecosistema (López *et al.* 2006). Michoacán ocupa el segundo lugar dentro de las entidades expulsoras de migrantes a EUA (con cerca del 11% nacional). De acuerdo con CONAPO (2002), en el año 2000, cerca del 13% de los hogares de La Huacana reciben remesas y el municipio es calificado con grado medio de intensidad migratoria. Respecto a las características de los migrantes del municipio se observa un predominio de migración masculina (60%) sobre la femenina, donde el 72% de los migrantes tiene entre 20 y 44 años (INEGI 2006). Esto nos habla de que son principalmente jóvenes en edades productivas los que abandonan sus localidades.

En lo que respecta a la dinámica de uso del suelo en La Huacana, ésta se caracteriza en parte, por el uso de la selva baja caducifolia para diferentes actividades como pastoreo, extracción de madera y leña. Estas actividades dan por resultado diferentes grados de apertura del dosel, o en otras palabras, diferentes niveles de degradación y no sólo la tala de la cobertura forestal. En lo que se refiere a las tierras agrícolas, éstas también tienen diferentes usos, los cuales varían a lo largo del año. En términos generales, estas variaciones corresponden a los siguientes periodos: junio-noviembre, cultivos; diciembre-marzo, pastoreo; y marzo-junio, descanso (suelo desnudo) (Ana Burgos, Comunicación personal).

2.2 Materiales

Los materiales que se utilizaron en este trabajo fueron:

- 1) Dos imágenes Landsat ETM (*path/row* 28/47), tomadas el 31 de enero de 2000 y el 8 de febrero de 2003;
- 2) Tres imágenes Aster dos de ellas tomadas el 5 y la otra el 30 de abril de 2006;
- 3) Los conjuntos de datos vectoriales de la carta topográfica escala 1:50,000 de INEGI;
- 4) Fotografías aéreas digitales de alta resolución (del orden de 1 metro en el terreno) referenciadas espacialmente con GPS (SEMARNAT, 2000);
- 5) Ortofotos digitales del INEGI escala 1: 20 000, elaboradas a partir de fotografías aéreas tomadas en 1995 y 1996 (resolución de 2 metros) y
- 6) La cartografía de ejidos del Registro Agrario Nacional (RAN).

3. Metodología

3.1 Técnicas de investigación de campo

El trabajo de campo consistió en dos actividades principales: 1) un recorrido de reconocimiento, de las coberturas del suelo y su dinámica de cambio, a lo largo del municipio y; 2) un taller para conocer la percepción local sobre la dinámica del cambio de uso del suelo que existe en el municipio. Estas actividades se llevaron a cabo durante julio de 2006 y, en septiembre de 2007 se realizó una visita para verificar los mapas y recabar información para preparar los escenarios.

3.1.1 Muestreo de uso/cobertura del suelo

Los recorridos del trabajo de campo se realizaron con la finalidad de visualizar la dinámica de cambio de uso/cobertura del suelo en la región así como de recabar información, sobre las coberturas y usos del suelo, para apoyar la clasificación de las imágenes de satélite.

Debido a las limitantes de acceso y seguridad en el área de estudio, se realizó un muestreo oportunista (Murphy *et al.* 1998), siguiendo las principales carreteras y poniendo énfasis en las áreas que han experimentado cambios en su uso/cobertura del suelo. Se registraron datos sobre los tipos dominantes de vegetación, y los sitios fueron descritos con ayuda de informantes clave, miembros del gobierno municipal 2005-07, quienes tienen un buen conocimiento del área.

El muestreo oportunista tiene muchas limitaciones, tales como el no permitir la generalización estadística, debido a que no se sigue un plan estricto y lógico, no obstante, no fue posible evitar su empleo debido a las condiciones prevalecientes al momento de realizar el trabajo de campo: limitantes de tiempo, de acceso y de seguridad.

Se usó un GPS para registrar la posición geográfica de los sitios muestreados, y como información auxiliar para apoyar los recorridos se usaron los mapas topográficos escala 1: 50 000 del INEGI y un compuesto de la imagen Landsat ETM de 2003 en falso color (bandas 4, 3 y 2) a escala 1:100 000. Al momento de

realizar el trabajo de campo no se habían adquirido las imágenes Aster de 2006, razón por la cual se trabajó con la imagen de 2003.

3.1.2 Conocimiento local

Se consideró relevante el contar con el conocimiento y percepciones de la comunidad de La Huacana, en lo relativo a la identificación de las principales causas y sitios afectados por el cambio de uso/cobertura del suelo. Esto debido a que muchas de las decisiones que afectan el uso del suelo se toman a nivel local, y de otra forma sería difícil conocer estas decisiones.

Se realizó un taller en el Consejo Municipal de Desarrollo Rural de La Huacana, el cual se constituyó en 2002 y se integró con el propósito de propiciar la convergencia de instrumentos y acciones de diversos programas sectoriales y ser la instancia donde se definan los criterios para impulsar el desarrollo rural en el municipio (HALH 2005).

Los participantes en el taller, apoyándose en mapas e imágenes de la región, pudieron reconocer las áreas que han cambiado su uso/cobertura de suelo recientemente y sugirieron las razones de dichos cambios. Además, los participantes llevaron a cabo un ejercicio prospectivo acerca de las áreas que, en su opinión, son más susceptibles de sufrir cambios en un futuro cercano.

Los participantes trabajaron divididos en tres grupos, los cuales se formaron dependiendo de la zona a la que pertenecen: 1) La Huacana (la parte noreste), 2) Zicuirán (la parte oeste) y 3) Infiernillo (el sur del municipio). Estas zonas tienen diferente disponibilidad de agua y, por lo tanto, diferentes oportunidades de uso de la tierra.

Cada grupo tuvo que responder a las mismas preguntas y fueron provistos de un anaglifo construido a partir de las ortofotos y el MDT. Este anaglifo se usó para que los grupos pudieran observar la región en la medida que respondían las preguntas y, fueron las siguientes:

- ¿Cuáles son las áreas que han experimentado cambios recientes de uso/cobertura del suelo?
- ¿Qué tipos de cambio se han experimentado?
- ¿cuáles son las causas de esos cambios?
- En el futuro cercano, ¿cuáles son las áreas que tienen más posibilidades de cambiar?

Las conclusiones de cada grupo se presentaron y discutieron en una sesión plenaria.

También se realizaron algunas entrevistas con las autoridades municipales para obtener una visión general del municipio. Específicamente las entrevistas se realizaron con el Presidente Municipal, Biol. Mario Romero Tinoco, y el Director de Desarrollo Rural, Ing. Jorge Luis González.

3.2 Procesamiento de Datos

Para preparar las capas de información que utiliza DINAMICA, y estimar los cambios de uso/cobertura del suelo, los insumos tuvieron que ser procesados de la siguiente manera:

- Corrección geométrica e interpretación visual interdependiente (FAO 1996) de las imágenes Landsat ETM y Aster, utilizando el software ERDAS Imagine 8.6. En un trabajo previo se probó la clasificación digital supervisada, pero los resultados fueron muy pobres debido a la confusión espectral entre las clases de cobertura de la selva baja caducifolia (Cuevas 2007). La interpretación interdependiente consiste en interpretar primero la imagen más antigua y después usar esta primera delineación como una referencia para interpretar la segunda imagen (más reciente), asegurando un nivel más alto de consistencia entre la clasificación de un conjunto de imágenes recientes e históricas. Los compuestos utilizados para la interpretación visual fueron los de las bandas 4,3,2 y 7,5,2 de las imágenes Landsat y sus equivalentes para las imágenes Aster (3,2,1 y 5,4,2). Ambos compuestos se utilizaron simultáneamente, ya que por ejemplo, las partes más secas son mejor discriminadas en el compuesto 7,5,2 mientras que las áreas agrícolas lo son en el compuesto 4,3,2.

- Se unieron los conjuntos de datos vectoriales de la carta topográfica escala 1:50,000 de INEGI para generar un mosaico del área de estudio, y obtener parte de los insumos que más adelante se usaron como variables explicativas en el modelo.

- A partir de las curvas de nivel se derivaron (1) un modelo digital del terreno (MDT) y (2) un mapa de pendientes, utilizando el programa ILWIS.

- Para calcular las distancias hacia los caminos, ríos principales y áreas urbanas, los rasgos vectoriales se convirtieron a formato raster y, el cálculo de la distancia euclidiana se realizó usando el software Arc/Info.

- Para importar las capas de información en DINAMICA se generaron archivos en formato ER Mapper, utilizando el software ENVI 4.0.

- Desde DINAMICA se generó un archivo (*stack*) con las capas seleccionadas como variables explicativas.

3.2.1. Clasificación de usos/coberturas del suelo

Las clases empleadas en la clasificación de las imágenes de satélite se derivaron de las observaciones en campo, así como de las posibilidades de discriminación de las mismas en el proceso de interpretación de las imágenes. Se consideró importante diferenciar los niveles de apertura del dosel en la SBC, los cuales reflejan tanto el impacto de las actividades agropecuarias como la diferente disponibilidad de agua a lo largo del territorio estudiado. Así mismo, en el caso de la agricultura se percibieron diferencias importantes en cuanto a la disponibilidad de agua que se reflejan en la productividad de esta actividad. Las clases utilizadas en la leyenda de los mapas de uso/cobertura del suelo se muestran en la tabla 1.

Tabla 1 – Clases de uso/cobertura del suelo

Acronimo	Tipo de uso/cobertura del suelo
BT	Bosque templado
SBC-c	Selva baja caducifolia cerrada
SBC-sa	Selva baja caducifolia semi-abierta
SBC-a	Selva baja caducifolia abierta
VR	Vegetación riparia
M	Malpaís
AT	Agricultura de temporal
AR	Agricultura de riego
AH	Agricultura de humedad
AsH	Asentamientos humanos
Mi	Minas

Las clases “pastizal” y “agricultura de temporal” no pudieron separarse debido a que su respuesta espectral es muy similar y, por lo tanto, no se distinguen en los compuestos de las imágenes que se interpretaron, y de esta manera se mantuvieron unidas. De la misma manera el bosque espinoso y las huizacheras quedaron incluidos en la clase de Selva Baja Caducifolia abierta.

3.2.2 Tasas de cambio

Se obtuvieron las áreas de los diferentes usos/coberturas del suelo para cada periodo, y posteriormente se calcularon las tasas de cambio, r , usando la siguiente ecuación (FAO 1996):

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

Donde A_1 es el área cubierta por un tipo dado de uso/cobertura del suelo en el tiempo 1, A_2 es el área de la misma cobertura en el tiempo 2 y t es el número de años del periodo de análisis.

3.3 Aplicación de DINAMICA

3.3.1 Autómata celular en DINAMICA

Un Autómata Celular (AC) es un modelo matemático de un sistema dinámico que evoluciona en pasos discretos. Es adecuado para modelar sistemas naturales que puedan ser descritos como una serie de objetos simples que interactúan localmente unos con otros.

Un AC consiste de un enrejado uniforme y regular, donde cada celda de la cuadrícula se conoce como célula cuyo valor es afectado por el valor de las células que se encuentran en su vecindad. Cada célula puede tomar un valor a partir de un conjunto finito de estados k (Heiko *et al.* 1998).

De acuerdo con esto, se aplica a todas las células de la cuadrícula, una función de transición f que toma como argumentos los valores de la célula en cuestión y los valores de sus vecinos, y regresa el nuevo valor que la célula tendrá en la siguiente etapa de tiempo.

DINAMICA, como un sistema AC, representa el paisaje como un arreglo regular de celdas n -dimensional que interactúan dentro de cierta vecindad y en donde el estado de cada celda en el arreglo depende de los estados previos de las celdas dentro del vecindario, según una serie de reglas de transición. Todas las celdas se actualizan simultáneamente en pasos de tiempo discretos (Soares-Filho *et al.* 2002).

El algoritmo usado para hacer que las celdas interactúen localmente es conocido como regla local del AC, el cual emplea funciones de transición especialmente diseñadas para reproducir las dimensiones y formas del cambio de uso del suelo. El cambio es restringido al vecindario local por lo que la acción a distancia está prohibida (Almeida *et al.* 2003).

La regla local del AC usada por DINAMICA está compuesta por dos funciones de transición complementarias: “expansión” (*expander*) y “parche” (*patcher*).

La función “expansión” está dedicada sólo a la expansión o contracción de parches previos de cierta clase. Las transiciones de un estado i a un estado j son

realizadas exclusivamente en las celdas adyacentes con un estado j . En contraste, la función “parche” está diseñada para generar o formar nuevos parches a través del mecanismo de semillero, es decir, a partir de la selección de una celda denominada semilla, que crece mediante agregación de celdas vecinas similares en valor de probabilidad de cambio. El operador “parche” realiza transiciones del estado i al estado j solamente en la adyacencia de celdas con un estado distinto al j (Almeida *et al.* 2003; Almeida *et al.* 2005). DINAMICA divide el mecanismo de selección de celdas dentro de este proceso y para cada transición se debe definir el porcentaje de transición ejecutada por la función “expansión”, el porcentaje restante será para la creación de nuevos parches.

DINAMICA modela las transiciones leyendo primero el mapa de probabilidad de cambio de uso/cobertura para escoger las celdas con mayor probabilidad de cambio, y para después disponerlas en orden en un arreglo de datos. La selección de las celdas núcleo (semilla) para los nuevos parches tiene lugar de arriba hacia abajo en este arreglo. Finalmente, un número específico de celdas alrededor de la celda núcleo son seleccionadas de acuerdo a su probabilidad de transición P_{ij} . Este mecanismo es usado en ambas funciones de transición.

Las probabilidades de cambio de uso/cobertura del suelo son calculadas a través de pesos de evidencia, y junto con las cadenas de Markov (ver apartado siguiente), son utilizadas para la definición de las tasas de transición para posibles tipos de cambio de uso/cobertura del suelo.

3.3.2 Probabilidades de transición espacial

Las probabilidades de transición espacial utilizadas para estimar las áreas más favorables para experimentar los cambios de uso/cobertura del suelo fueron calculadas usando pesos de evidencia. Los pesos de evidencia son derivados del método Bayesiano de probabilidad condicional, y su buen desempeño ha sido probado en la combinación de evidencias en medicina y geología, principalmente (Bonham-Carter 1994). Se trata de un método inducido por datos, que es aplicado cuando se dispone de suficientes datos para estimar la importancia relativa de la evidencia por medio de estadística (Almeida *et al.* 2003). Una ventaja de este

método es que no está restringido por las suposiciones de los métodos paramétricos (que requieren una distribución normal de los datos), las cuales generalmente son violadas por los datos espaciales.

En términos generales los pesos de evidencia, tal y como se mencionó previamente, son derivados de la probabilidad posterior o condicional, es decir, la probabilidad de que un evento (D) ocurra (por ejemplo una transición particular de cambio de uso del suelo), dada la presencia de cierta evidencia (B) (variable explicativa), y esto puede expresarse por

$$P[D|B] = \frac{P[D \cap B]}{P[B]} \quad (2)$$

donde $P[D|B]$ es la probabilidad de que un evento D ocurra, dada la presencia de la evidencia B.

Ciertas manipulaciones algebraicas nos permiten representar la probabilidad condicional en términos de su “odds ratio”, es decir, del cociente entre las probabilidades de que se produzca un hecho en un grupo, y las probabilidades de que se produzca en otro grupo; y después definir pesos positivos y negativos como se muestra en seguida:

$$W^+ = \log_e \frac{P[B|D]}{P[B|\bar{D}]} \quad (3)$$

$$W^- = \log_e \frac{P[\bar{B}|D]}{P[\bar{B}|\bar{D}]} \quad (4)$$

donde,

B = presencia de evidencia (factor condicional),

\bar{B} = ausencia de evidencia (factor condicional),

D = presencia de un evento,

\bar{D} = ausencia de un evento

W^+ indica la importancia de la presencia de un factor para la ocurrencia de un evento. Si es positivo la presencia del factor es favorable para la ocurrencia del evento y si es negativo, no es favorable.

W^- se usa para evaluar la importancia de la ausencia del factor para la ocurrencia del evento, cuando es positivo la ausencia del factor es favorable para la ocurrencia del evento y si es negativo, no lo es.

DINAMICA cuenta con un editor donde el usuario puede visualizar y modificar los pesos de evidencia usando su conocimiento del proceso, de esta forma es posible combinar ambas aproximaciones: la estadística y la del conocimiento experto.

DINAMICA utiliza una matriz de transición fija dentro de cada fase. Esta matriz describe un sistema que cambia en incrementos de tiempo discreto, en los cuales, el valor de cualquier variable en un periodo de tiempo dado es la suma de los porcentajes fijos del valor de las variables en el periodo de tiempo previo. La suma de las fracciones a lo largo de la columna de la matriz de transición es igual a uno. La línea diagonal de la matriz de transición no necesita llenarse, dado que modela el porcentaje de celdas que no cambian.

Las matrices de transición fueron derivadas por medio de la propiedad de las cadenas de Markov (Ecuación 5) para contar con las tasas anuales de transición y poder proyectar las tendencias de cambio sobre una base anual (Bell e Hinojosa 1977; Soares-Filho *et al.* 2002).

$$P^t = HV^t H^{-1} \quad (5)$$

Donde P es la matriz de transición original, H y V son sus matrices vector y eigen, y t es la fracción o un múltiplo de su periodo de tiempo.

3.3.3 Calibración del modelo

Para calibrar el modelo se usaron los mapas de uso/cobertura del suelo del periodo 2000-2003; y posteriormente el modelo se corrió para generar un mapa simulado del año 2006 con propósitos de validación. Finalmente los escenarios se generaron para el año 2015.

Todos los datos usados en esta aplicación se representaron en una malla de celdas de 30 X 30 m.

Los mapas elaborados identifican once diferentes categorías de uso/cobertura del suelo (ver tabla 1), y nos centramos en siete cambios o transiciones de uso/cobertura del suelo que se muestran en la figura 3. De estas transiciones cinco se dan en dirección de la degradación y solo dos en la de recuperación.

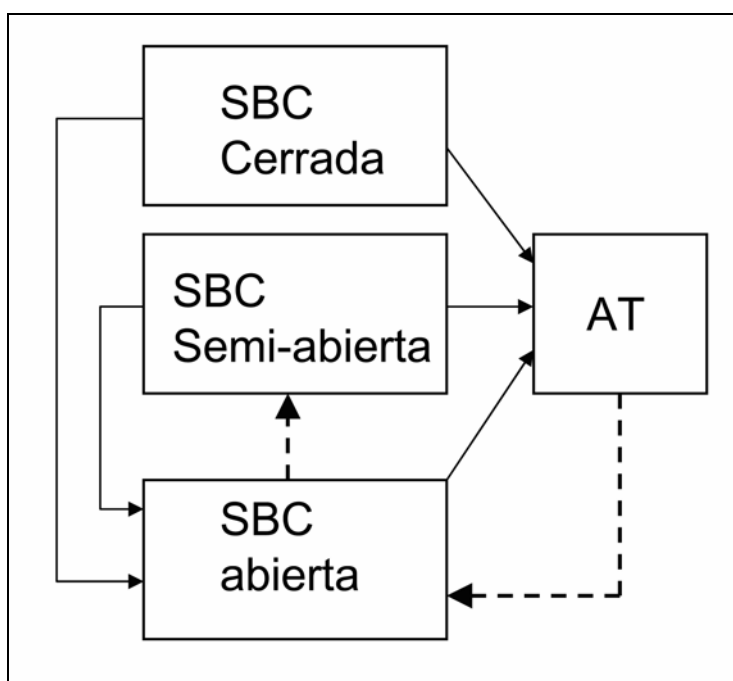


Figura 3 – Transiciones de uso/cobertura del suelo.

Las transiciones en dirección de la degradación aparecen en línea continua, mientras que las que van en dirección de la recuperación se indican con línea punteada.

La selección de las variables utilizadas para explicar las siete transiciones de uso/cobertura del suelo se determinó tomando en cuenta la lógica del proceso, así como usando la información obtenida en el taller y las entrevistas con informantes clave. Las seis variables seleccionadas y usadas en el análisis estadístico del cambio de uso del suelo fueron: 1) elevación, 2) pendiente, 3) distancia a los ríos principales, 4) distancia a los diferentes tipos de caminos (carreteras pavimentadas, terracerías, brechas y veredas), 5) distancia a los principales asentamientos humanos y 6) tenencia de la tierra. En la figura 4 se muestran gráficamente estas seis variables, cabe aclarar que los rangos mostrados en la figura no representan los rangos que se utilizaron para el cálculo de los pesos de

evidencia, ya que DINAMICA calcula esos rangos para cada variable según el tipo de transición analizada.

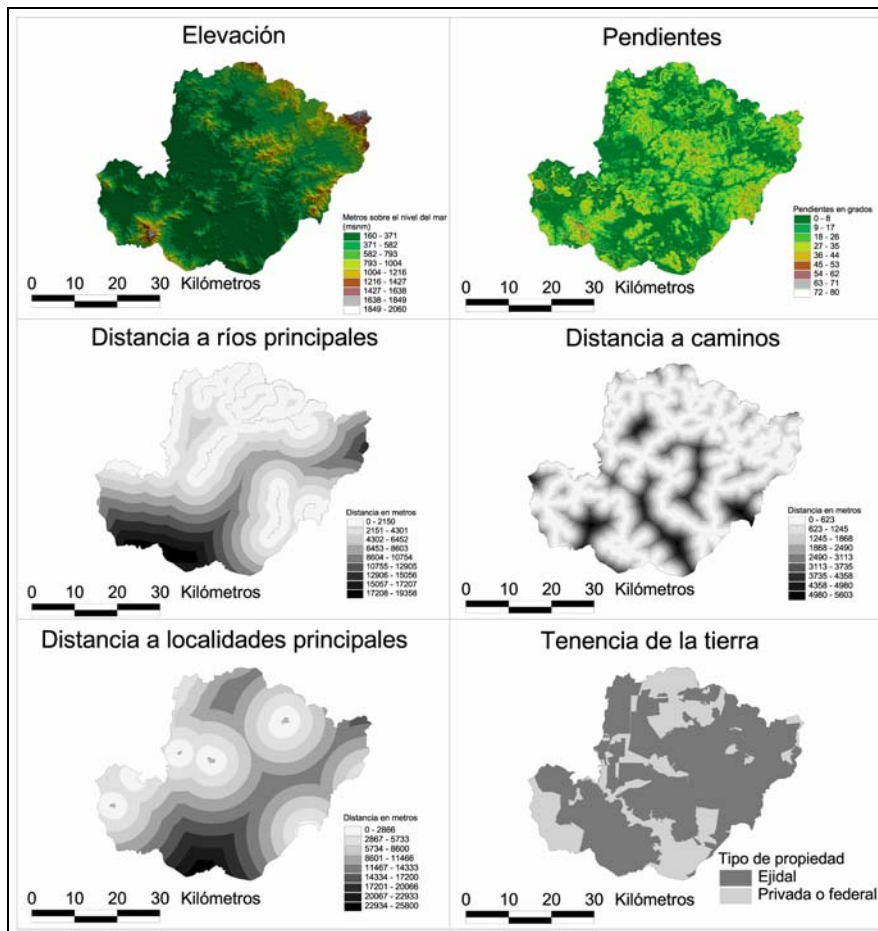


Figura 4 – Variables explicativas utilizadas en el modelo

Utilizamos el coeficiente V de Cramer (Bonham-Carter 1994) para probar la independencia de las variables y eventualmente excluir alguna variable debido a su dependencia. Este coeficiente es una medida estadística de la fuerza de asociación o dependencia entre dos variables categóricas (nominales) en una tabla de contingencia. Mientras el índice esté más cercano a 0, la asociación entre variables categóricas es menor. Por otro lado, un valor cercano a 1 es un indicador de la fuerte asociación entre las variables.

3.4 Escenarios

La construcción de escenarios es una herramienta que puede servir para entender y anticipar los cambios y, de esta forma mejorar la toma de decisiones. Los escenarios no son predicciones en un sentido estricto, sino que ofrecen la visión de diferentes futuros alternativos informados, posibles e imaginados en los cuales se toman las decisiones (Chermack 2007).

En el presente trabajo se construyeron tres escenarios basados tanto en el patrón actual de uso del suelo que refleja las actividades que se realizan en La Huacana, como en las tendencias sugeridas por el comportamiento de las variables en la calibración del modelo de cambio de uso/cobertura del suelo.

El primer escenario es el denominado “tendencial”, el cual mantiene la misma tendencia que se observó en el periodo 2000-2003 y, por lo tanto, está basado en la misma matriz de cambio y comportamiento de las variables explicativas de ese periodo. Si bien, la posibilidad de que la tendencia se mantenga es poco probable debido a que el contexto histórico cambia, dicho escenario se generó con fines de referencia.

El segundo escenario llamado “ganadero” se basa en la idea de que continúe la tendencia que existe en el trópico seco de practicar la ganadería extensiva, la cual resulta ser una actividad menos riesgosa que la agricultura. Para correr este escenario, se agregó una variable que consiste en la categorización de los ejidos de acuerdo a la posibilidad de que mantengan su cohesión, o de que, dada su problemática organizativa y económica, vendan sus tierras a pequeños propietarios, quienes convierten la selva baja caducifolia en pastizales para uso ganadero de manera más rápida que los ejidatarios, debido a la disponibilidad de mayores recursos para realizar dicha conversión. Asimismo, la tasa de deforestación se incrementó proporcionalmente a la tendencia de incremento en el precio del ganado, de los apoyos gubernamentales a esta actividad y de la tendencia a la disminución del precio de los cultivos.

Finalmente, el escenario “deseable” está basado en el incremento de iniciativas para la conservación de la selva baja caducifolia y para el uso sustentable de los

recursos, tales como la promoción de la ganadería sustentable (donde en el área de pastoreo además de contener pastos nativos o introducidos, se dejan o plantan árboles que tienen alguna utilidad para el ganado -forraje, sombra y cerco vivo- o para la conservación del suelo y agua) (HALH 2005), el turismo rural, el aprovechamiento de productos forestales no maderables, la agricultura orgánica, la optimización del agua y, la implementación de áreas naturales protegidas. Para correr este escenario se agregaron los límites del Área Natural Protegida Infiernillo-Zicuirán como una nueva variable con tres categorías: 1) área núcleo, 2) área de amortiguamiento y 3) área sin protección. En este escenario se asume que la actual política municipal, enfocada a la conservación, tendrá continuidad, que el índice de deforestación sea menor y que los ejidos obtengan incentivos al proteger la selva baja caducifolia y no cambiar su uso y, por lo tanto, mantengan su estructura actual.

3.5 Integración del conocimiento local

La información recopilada durante el taller y en las entrevistas fue utilizada en diferentes fases durante la construcción del modelo (figura 5). Primero, ayudó en la selección de las variables explicativas usadas como factores condicionantes de las diferentes transiciones de uso/cobertura del suelo. Posteriormente, se utilizó como conocimiento experto en la modificación de los pesos de evidencia y, finalmente, ayudó a conceptualizar las diferentes tendencias posibles a futuro.

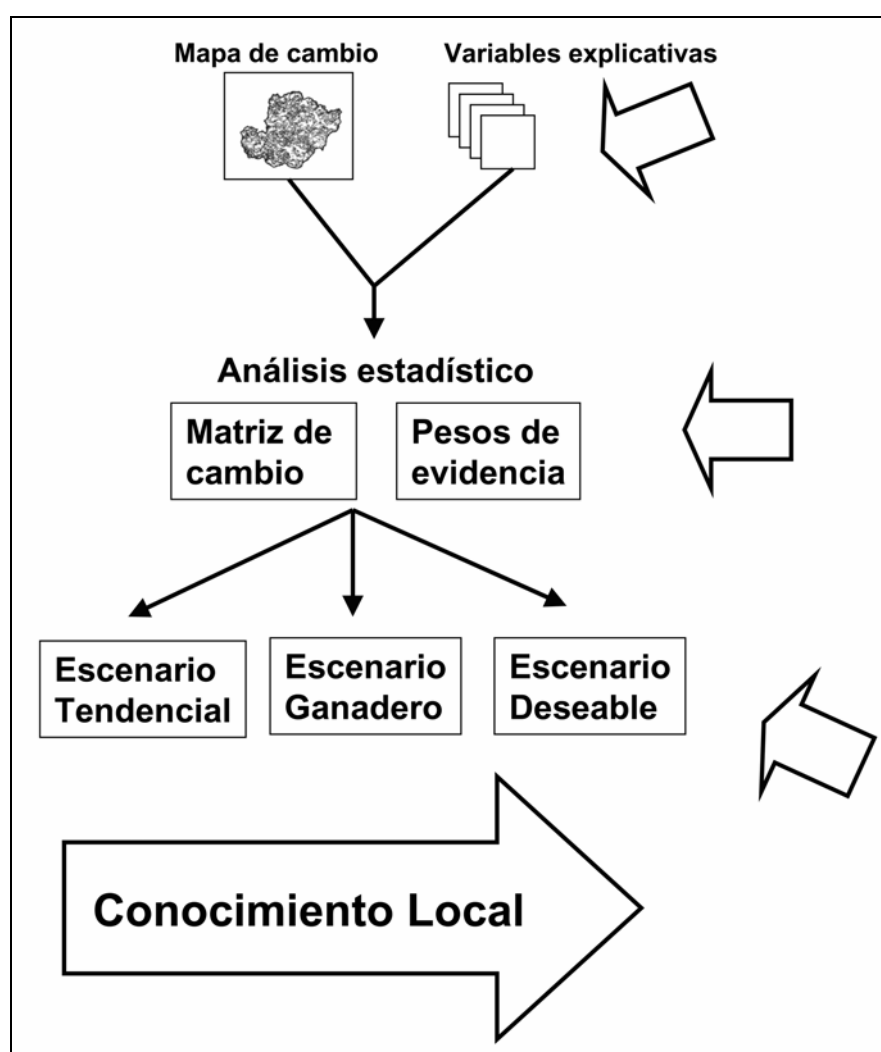


Figura 5 – El conocimiento local en las diferentes etapas de la construcción del modelo

3.6 Validación

Para validar el modelo prospectivo de uso/cobertura del suelo, lo aplicamos al mapa de uso/cobertura del suelo de 2003, con la intención de modelar el uso/cobertura del suelo conocido (2006). De esta manera, la evaluación del modelo se basó en la comparación entre los mapas simulado y observado. No obstante, como han mencionado Paegelow y Camacho-Olmedo (2005), es necesario estar consciente de que un mapa simulado y uno real pueden tener mucha coincidencia debido a la persistencia de los usos/coberturas. Es por ello que la comparación se enfocó sobre las áreas de cambios, tanto observados como simulados.

Por otra parte, los modelos espaciales requieren de una comparación dentro del contexto de un vecindario, esto es debido a que los mapas difícilmente coinciden exactamente celda por celda pero pueden presentar patrones espaciales y acuerdo espacial dentro de una cierta vecindad de celdas. Para llevar a cabo esta validación se han desarrollado varios métodos de comparación basados en la vecindad. Por ejemplo, Constanza (1989), introdujo el procedimiento del ajuste de múltiple resolución que compara un mapa ajustado dentro de ventanas de tamaño creciente. Pontius (2002) presentó un método similar, pero que puede diferenciar errores debidos a su localización y errores de cantidad. Power y cols. (2001), proponen un método de comparación basado en un patrón jerárquico de correspondencia difuso. Couturier y cols. (2007) usaron una aproximación difusa basada en la banda epsilon. Por su parte, Hagen (2003), desarrolló nuevas métricas, incluyendo el *kfuzzy*, considerado el equivalente al índice Kappa, y la similitud difusa que toma en cuenta lo difuso de la localización y de la categoría dentro de un vecindario de celdas. El método implementado en DINAMICA es una modificación de éste último.

La prueba de similitud difusa está basada en el concepto de la localización difusa, en el cual la representación de una celda está influenciada por la celda en si misma y, en menor medida, por las celdas de su vecindario (Hagen 2003).

La comparación entre los cambios observados y simulados se realiza primero, creando un vecindario (zona difusa) para los parches con cambios simulados y este nuevo mapa es el que se compara con los cambios reales. Posteriormente se repite el procedimiento, pero ahora la creación del vecindario se realiza sobre el mapa de cambios observados y este mapa difuso se compara con el de los cambios simulados originales. La similitud total de este par de mapas se puede calcular promediando los valores de similitud de las dos comparaciones para todas las celdas del mapa. Debido a que los mapas con evaluación fuzzy tienden a sobreestimar el valor de la similitud (Hagen 2003), se recomienda tomar el valor mínimo de las dos comparaciones. Es posible repetir esta prueba varias veces cambiando el tamaño del vecindario.

4. Resultados

4.1 Datos derivados del trabajo de campo

4.1.1 Muestras de uso/cobertura del suelo

Durante el trabajo de campo realizado se obtuvieron un total de 77 puntos de muestreo, ocho de ellos estuvieron fuera del área de estudio. La figura 6 muestra la distribución de las muestras de campo dentro del área de estudio y en la tabla 2 se presenta un resumen de las muestras de acuerdo a la leyenda.

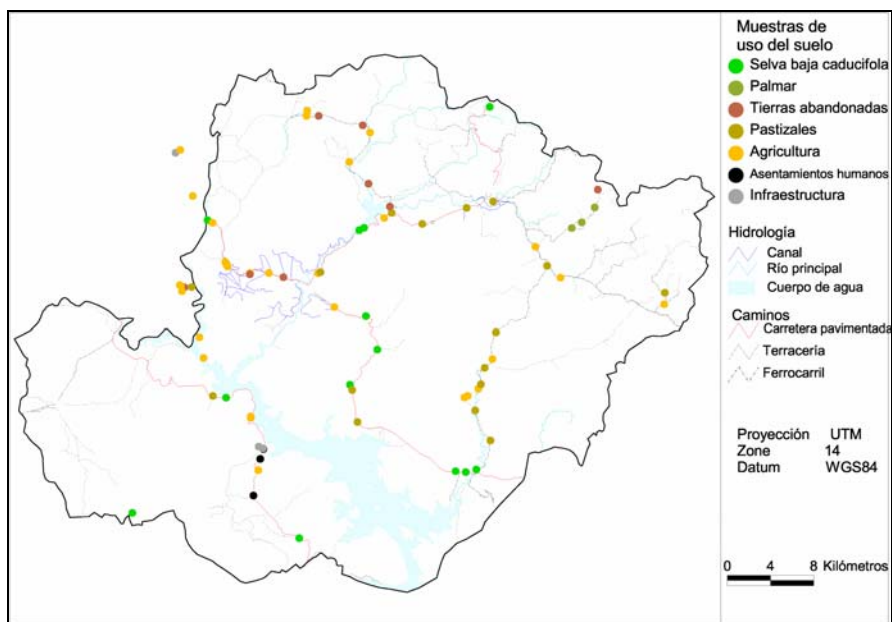


Figura 6 – Muestras de uso/cobertura del suelo

El número de puntos en la categoría Pastizal y Agricultura es considerablemente mayor que aquel de las otras clases debido a que, como se mencionó anteriormente, se empleó un muestreo oportunista a lo largo de los principales caminos, y por lo tanto, correspondió a tierras cultivadas, principalmente. Las categorías reportadas en el trabajo de campo varían ligeramente de la leyenda utilizada en la clasificación final de los mapas, debido a la diferencia de escalas. Las dos clases no existentes en la leyenda final corresponden: 1) Palmar que se incluye en SBC y, 2) Tierras abandonadas corresponden a SBC-sa ó SBC-a.

Tabla 2 – Resumen de puntos de muestreo según tipo de uso/cobertura

Uso/cobertura	Número de muestras
Selva Baja Caducifolia	13
Palmar	4
Tierra abandonada	8
Pastizal / Ganadería	16
Agricultura	30
Asentamiento humano	3
Infraestructura	3

4.1.2 Sistematización del conocimiento local

El taller en el Consejo Municipal de Desarrollo Rural de La Huacana se llevó a cabo del 20 de Julio de 2006 (figura 7), en donde los participantes en la reunión fueron los representantes de los ejidos (comisarios ejidales) y de algunos grupos de productores. La reunión contó con la asistencia de 54 personas, la mayoría de ellas son campesinos que tienen un buen conocimiento sobre la región.



Figura 7 Foto del Taller realizado durante la Asamblea del COMUDER el 26 de julio de 2006

De los 62 ejidos del municipio, 39 contaron con representación en el taller: asistieron 37 comisarios ejidales, un jefe de tenencia y un encargado del orden (tabla 3). Los datos anteriores revelan que estuvieron representados el 63% de los ejidos. En la figura 8 se muestran estos ejidos y las claves que los identifican tienen sus correspondencias en la tabla 3. Los polígonos sin clave corresponden a Anexos de los ejidos.

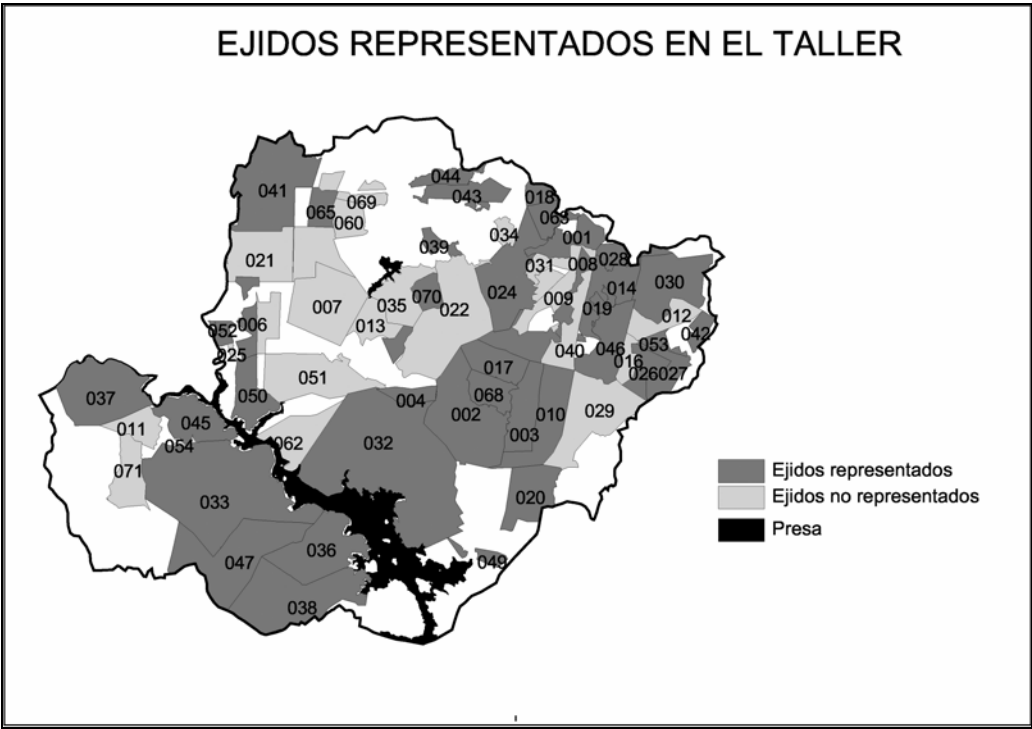


Figura 8 Ejidos con representación en el Taller

Tabla 3 Lista de Ejidos del Municipio de La Huacana y reporte de la asistencia de sus representantes al Taller

CLAVE	NOMBRE DEL EJIDO	Asistió al taller
001	AGUA BLANCA	CE
002	EL ALGODON Y OROPEO Y ANEXOS REPARO DE LUNA, PASO DE LEÓN Y LA PALMITA	CE
003	LAS ANONAS Y ANEXOS	CE
004	CAJA DE ZICUIRAN	CE
006	EL CHAUZ	CE
007	CONGURIPO	-
008	LOS COPALES	CE
009	DAVID C MANJARREZ	-
010	ARRONJADERO	CE
011	EL CHILAR	-
012	EL ESTRADITO Y ANEXOS	-
013	EL JAGUEY Y SUS ANEXOS, EL TEPETATE Y EL CALDERON	-
014	EL SALITRILLO DEL LIMON DE JORULLO	CE
015	EL PALMAR Y SUS ANEXOS, MESA DE VICENTELO PUERTA	CE
016	LIMON DE JORUYO	CE
017	EL TERRERO	CE
018	EL VALLECITO	CE
019	ZAPOTE DE JORULLO	CE
020	GUADALUPE OROPEO Y ANEXO, LAS CRUCITAS	CE
021	HUATZIRAN Y ANEXOS, LAS VACAS, LOS PLACERES,	-
022	ICHAMIO Y SU ANEXO EL TIZATAL	-
023	JOYA DE ALVAREZ	-
024	LA HUACANA	CE
025	LA JOYITA	-
026	MANGA DE CUIMBO	-
027	CUIMBO Y ANEXOS	CE
028	MATA DE PLATANO	CE
029	CAYACO	-
030	LA PEDREGOSA Y SUS ANEXOS, CHANGUNGAL, REMATE Y SANTA INES	CE
031	CARAMICUAS	-
032	LAS ESTANCIAS	CE
033	N.C.P.A. LA ESTANCIA O BELLAS FUENTES Y SUS ANEXOS	CE
034	LAS PATACUAS Y SU ANEXO	-
035	LAS TAMACUAS	-
036	GENERAL LAZARO CARDENAS (LOS CIRIANCITOS)	CE
037	LOS OLIVOS	JT
038	LOS POCITOS	CE
039	MANGA DE CHAVEZ Y SUS ANEXOS, EL PALMARITO Y LA CRUCITA	EO
040	NARANJO DE JORULLO	-
041	NARANJO DE ZIRITZICUARO	CE
042	NUEVO INGUARAN	CE
043	OJO DE AGUA DE SAN IGNACIO Y SU ANEXO	CE

CLAVE	NOMBRE DEL EJIDO	Asistió al taller
044	PEDRO PABLO	CE
045	POTRERILLOS DE RENTERIA	CE
046	PUEBLO VIEJO	CE
047	SAN FRANCISCO DE LOS RANCHOS	CE
049	SINAGUA	CE
050	VILLA HERMOSA	CE
051	ZICUIRAN	-
052	MILIAN	CE
053	FINCA DE INGUARAN	CE
054	CUPUAN CHICO	-
060	SAN ISIDRO Y LOS ADOBES	-
062	COL FRANCISCO VILLA	-
063	PUERTA DE LA PLAYA	CE
065	LOS LIMONES Y SUS ANEXOS, EL CHUPADERO Y LOS BARRILLOS	CE
068	EL CAPIRITO	CE
069	EL CIRUELO	-
070	COLONIA LAZARO CARDENAS	CE
071	N.C.P.E. ESFUERZO DEL CAMPESINO	-
	LÁZARO CÁRDENAS DEL RÍO (CUPUAN EL RÍO)	-
	LOS TERREROS Y ANEXOS	-

Nota: CE = Comisario Ejidal, JT = Jefe de Tenencia, EO = Encargado del Orden. Los últimos dos ejidos de la lista no tienen clave ni representación en el mapa.

Además se contó con la presencia de otras 15 personas que son representantes de grupos de productores y del gobierno municipal (tabla 4).

Tabla 4 Representantes de productores y del gobierno municipal asistentes al Taller

DESCRIPCIÓN DEL TIPO DE REPRESENTANTE
PRODUCTOR DE LIMÓN DEL CHAUZ
REPRESENTANTE DE LAS COPERATIVAS PESQUERAS LA ALGODONERA
2 REPRESENTANTES DEL DISTRITO DE DESARROLLO RURAL 085
ASESOR TÉCNICO DEL PROGRAMA HIGUERILLA
DELEGADO FORESTAL COFOM
PRESENTE DE LA ASOCIACIÓN AGRÍCOLA EMILIANO ZAPATA
ASESOR DE PROMOTORES DE DESARROLLO ECONÓMICO (PRODESEC)
REPRESENTANTE DE EJIDO COINBIO TIERRA CALIENTE – HUATZIRÁN
REPRESENTANTE DE PRODUCTORES DE AJONJOLÍ, ZICUIRÁN
REPRESENTANTE DE LA ASOCIACIÓN GANADERA LOCAL
TÉCNICO EJIDAL OROPEO
2 REPRESENTANTES DE LA DIRECCIÓN DE DESARROLLO RURAL DEL GOBIERNO MUNICIPAL DE LA HUACANA
REPRESENTANTE DIRECCIÓN DE ECOLOGÍA DEL GOBIERNO MUNICIPAL DE LA HUACANA

4.1.2.1 Áreas que han experimentado cambios recientes de uso/cobertura del terreno

Como se mencionó en el capítulo 3, los asistentes al taller fueron divididos en tres grupos de trabajo dependiendo del área a la que pertenecen: 1) La Huacana, 2) Zicuirán, y 3) Infiernillo, y es por ello que la información recabada es presentada de acuerdo a estas áreas.

La tabla 5, muestra la información reportada en el taller sobre las áreas que han experimentado cambios recientes en su uso/cobertura y en la figura 9 se puede observar la ubicación de esos lugares. La zona que reporta más áreas con cambios es la de La Huacana, la cual corresponde al área más poblada y con mayor disponibilidad de agua del municipio.

Tabla 5 – Áreas con cambios recientes de uso/cobertura del suelo en La Huacana según los participantes en el Taller.

NUM. *	LOCALIDAD	ZONA
166	LA ZAUDA	LA HUACANA
72	OJO DE AGUA DE SAN IGNACIO (SAN IGNACIO)	LA HUACANA
21	CERRITO COLORADO	LA HUACANA
107	EL VALLE	LA HUACANA
89	PUERTA DE LA PLAYA	LA HUACANA
4	AGUA BLANCA	LA HUACANA
1	LA HUACANA	LA HUACANA
67	MATA DE PLATANO	LA HUACANA
50	ICHAMIO	LA HUACANA
78	LA PEDREGOSA	LA HUACANA
25	LOS COPALES	LA HUACANA
110	ZAPOTE DE JORULLO (EL ZAPOTE)	LA HUACANA
43	EL ESTRADITO	LA HUACANA
58	EL NARANJITO	LA HUACANA
44	FINCAS DE INGUARAN	LA HUACANA
61	MANGA DE CUIMBO	LA HUACANA
34	CUIMBO	LA HUACANA
71	NARANJO DE TZIRITZICUARO	ZICUIRAN
62	MANGA DE CHAVEZ	ZICUIRAN
113	ZICUIRAN	ZICUIRAN
15	LA CAJA DE ZICUIRAN EN LOS LIMITES DE LA PRESA ZICUIRÁN **	ZICUIRAN
149	RINCON DE POTRERILLOS (POTRERILLOS)	INFIERNILLO
177	VILLAHERMOSA	INFIERNILLO
82	PIEDRA VERDE	INFIERNILLO
98	SAN PEDRO BARAJAS	INFIERNILLO
35	CUPUAN DEL RIO	INFIERNILLO
12	BELLAS FUENTES (NUEVO CENTRO)	INFIERNILLO
96	SAN FRANCISCO DE LOS RANCHOS (EL FALSETE)	INFIERNILLO

* Los números de las localidades corresponden con los que aparecen en el mapa de la figura 8

** No se indica en el mapa por tratarse de un área y no de una localidad, no obstante aparece la presa Zicuirán

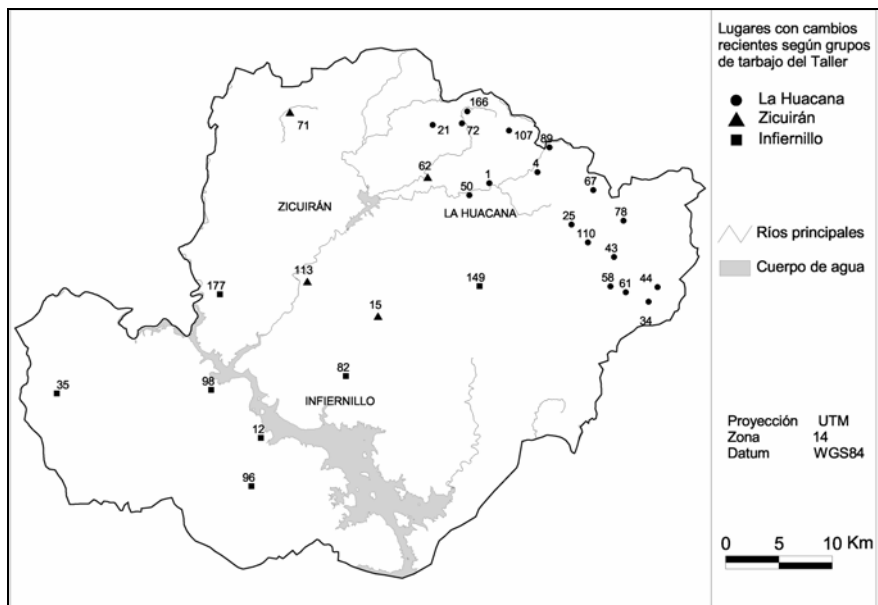


Figura 9 Localidades donde los participantes en el Taller detectaron cambios recientes

La mayoría de los lugares mencionados son nombres de poblados, los cuales pudieron ser fácilmente localizados en un mapa y sobrepuestos al mapa de uso/cobertura del suelo de 2006. De un total de 28 puntos, 15 se localizan sobre agricultura de temporal y pastizales, uno sobre agricultura de humedad, tres sobre asentamientos humanos, cinco sobre selva baja caducifolia abierta, dos sobre selva baja caducifolia semi-abierta y dos sobre selva baja caducifolia cerrada.

Para el área de Infiernillo, el taller reveló que los cambios más importantes en el uso/cobertura del suelo sucedieron hace 40 años cuando se construyó la presa Infiernillo; después, hace 10 o 15 años cuando las líneas de conducción de electricidad y los gaseoductos se construyeron; y más recientemente con la construcción de la autopista.

4.1.2.2 Tipos y causas de los cambios de uso/cobertura del suelo

La información sugerida por los participantes en el taller, acerca de los principales tipos de cambio de uso/cobertura del suelo, hace referencia a 1) la deforestación y, 2) el incremento de los matorrales de huizache (*Acacia cochliacantha spp*) en las tierras abandonadas.

Con relación a las causas de la deforestación, se mencionó que existe la creencia de que el ganado es más productivo sobre pastizales inducidos que en la selva

baja nativa. Otra causa de la deforestación mencionada fueron los cultivos ilegales.

Por su parte, el abandono de las tierras se percibe como consecuencia de los bajos precios de los productos agrícolas y, asociado a ello, el alto índice de migración de la gente joven a los Estados Unidos.

Como causas del cambio que se identificaron a nivel histórico en la región fueron: la construcción de infraestructura y la promoción de la actividad agrícola después de construida la presa Infiernillo.

Finalmente, se mencionaron algunas consecuencias de los cambios: 1) el incremento de la sequía derivada de la deforestación y, 2) la contaminación y erosión de los suelos producto del uso de agroquímicos en la actividad agrícola.

4.1.2.3 Análisis prospectivo

Para el equipo de La Huacana los cambios a futuro en el uso del suelo se avizoran en dos sentidos. Por una parte cambios positivos, derivados de los programas de reforestación que en el momento en que se realizó el taller llevaba a cabo el gobierno municipal, en Puerta La Playa, Zapote de Jorullo, La Pedregosa y El Salitrillo. Y en segundo término se mencionaron cambios negativos originados por la contaminación del agua en la zona minera y que afectaría a Fincas de Inguarán, Cuimbio y Pueblo Viejo.

Para los integrantes del equipo de Zicuirán los cambios a futuro sólo son vistos en la dirección de mayor degradación y, debido a la posibilidad de que se agrave la carencia de agua, se advirtió la reducción de la agricultura y la ganadería, y como una consecuencia lógica el aumento de la migración de la población de la zona en busca de mejores oportunidades.

Finalmente, para el equipo que trabajó la zona de Infiernillo se vislumbran dos vertientes de los cambios. La primera y predominante es la referente a la degradación y el avance de la frontera agrícola en la franja que va de Potrerillos a Pocitos, y el cerro Condébaro. Mientras que por otra parte se contempla la reforestación en las tierras marginales a la presa Infiernillo.

4.2 Superficies y tasas de cambio

La tabla 6 muestra el área de cada clase de uso/cobertura para 2000, 2003 y 2006, junto con su respectiva tasa de cambio. La selva baja caducifolia presenta un importante decremento en sus tres diferentes estados (cerrada, semi-abierta y abierta), sobre todo considerando lo corto de los periodos analizados. En los dos periodos analizados, la SBC cerrada es la cobertura que experimenta la mayor pérdida en superficie. Por otra parte, la categoría que gana área significativamente es la agricultura de temporal, categoría que incluye los pastizales inducidos o cultivados. Los mapas de uso/cobertura del 2000 y 2003 se muestran en la figura 10. Las tasas de deforestación encontradas están de acuerdo con otras estimaciones, aunque pueden considerarse altas (Trejo y Dirzo 2000; Bocco *et al.* 2001; Mas *et al.* 2004). También, es importante notar que las tasas de deforestación se incrementan dramáticamente durante el segundo periodo (2003-2006).

Tabla 6 – Áreas de uso/cobertura del suelo de La Huacana en 2000, 2003 y 2006

Clases de uso/cobertura del suelo	2000 (Ha)	2003 (Ha)	2006 (Ha)	Tasa 2000-2003 (%/año)	Tasa 2003-2006 (%/año)
Bosque templado	902	902	890	0.00	-0.46
Selva baja caducifolia (cerrada)	66 118	65 720	62 441	-0.20	-1.69
Selva baja caducifolia (semi-abierta)	36 512	36 375	35 604	-0.13	-0.71
Selva baja caducifolia (abierta)	39 440	39 441	41 302	0.00	1.55
Vegetación Riparia	1 770	1 770	1 707	0.00	-1.20
Malpais	128	128	128	0.00	0.05
Agricultura de temporal (incluye pastizales)	30 572	31 097	33 326	0.57	2.33
Agricultura de riego	7 757	7 763	7 800	0.03	0.16
Agricultura de humedad	1 410	1 414	1 411	0.09	-0.06
Cuerpo de agua	8 889	8 889	8 888	0.00	0.00
Asentamiento humano	32	32	32	0.00	-0.13
Minería	405	405	405	0.00	0.03

Sin embargo, esto puede atribuirse parcialmente al hecho de que las áreas deforestadas pudieron ser más fácilmente identificadas en las imágenes ASTER, usadas en 2006, que en las Landsat, usadas en las fechas previas, debido a su mayor resolución espacial. Por consiguiente, es muy probable que parte de los parches de deforestación detectados en 2006 ya existían, lo cual puede introducir

una sobreestimación de la tasa de deforestación durante el último periodo y una subestimación durante el primero.

Otra situación que debe considerarse al interpretar los datos se refiere a que los años 2003, 2004 y 2005 fueron de muy bajas precipitaciones y ello trajo consigo el abandono de la agricultura en esos años (Ana Burgos, Comunicación personal). Esta situación también pudo haber tenido repercusiones en la dinámica del dosel y algunos cambios detectados como mayor apertura del dosel, no necesariamente se refieren a la degradación de la cobertura de la SBC, sino simplemente reflejan la menor humedad de ese periodo.

En lo que se refiere a la localización de los cambios, las tierras que se convierten de SBC a AT, se observan principalmente en la porción norte del municipio. Mientras que las áreas que experimentan el resto de cambios (entre los diferentes estados de conservación de la selva y los que pasan de AT a SBC) se distribuyen de manera homogénea en todo el municipio, sin observarse tendencia alguna en su localización.

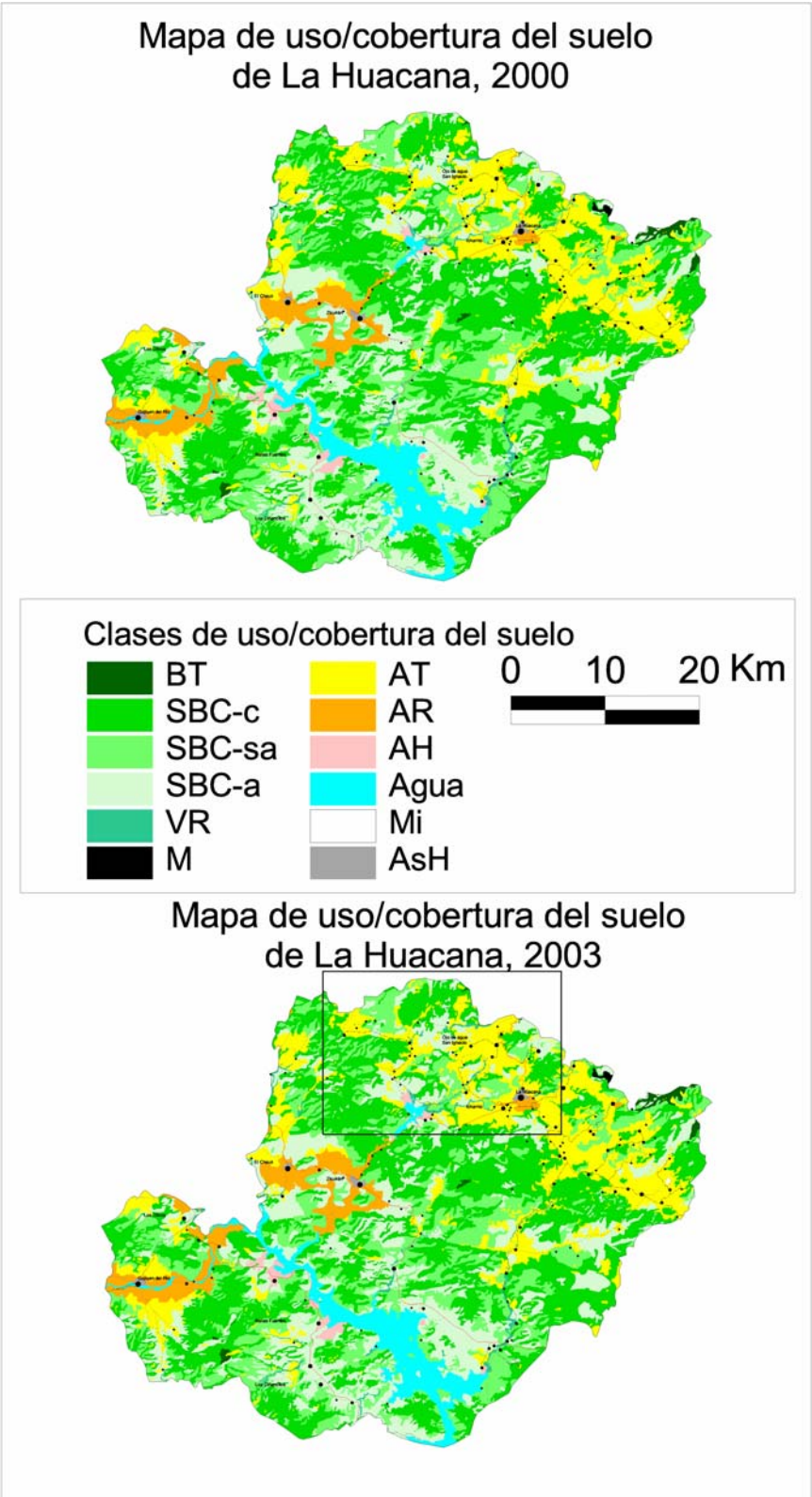


Figura 10 – Mapas de uso/cobertura del suelo de La Huacana, 2000 y 2003

4.3 Desempeño del modelo

Los resultados de la prueba de correlación entre las variables (tabla 7) muestran que la mayoría de los valores fueron menores de 0.3 para el coeficiente de Cramer (V). Sólo la correlación entre tenencia de la tierra y pendiente tuvo un valor de 0.7, no obstante ambas variables se mantuvieron por considerarlas factores explicativos importantes en el área de estudio.

Tabla 7 – Correlación entre las variables explicativas

Primera Variable	Segunda Variable	Crammer			Entropy	
		Chi ²	Crammer (V)	Contingency (C)	Joint Entropy	Joint Information Uncertainty
d2cam	d2loc	1.53E+06	0.157673	0.545048	3.27196	0.132205
d2cam	d2rios	3.47E+06	0.237517	0.699675	3.33058	0.28773
d2cam	dem	1.18E+06	0.138442	0.495734	3.25743	0.108617
d2cam	tenencia	432158	0.0838035	0.326585	2.39429	0.058171
d2cam	pendiente	2.68E+06	0.208541	0.651969	3.05582	0.241952
d2loc	d2rios	2.38E+06	0.191147	0.629876	3.04665	0.202338
d2loc	dem	834468	0.113171	0.432835	2.83456	0.0733713
d2cd	tenencia	257121	0.06282	0.257533	1.9308	0.0338092
d2cd	pendiente	1.26E+06	0.138808	0.507454	2.78419	0.127879
d2rios	dem	1.29E+06	0.140464	0.511928	3.11953	0.125389
d2rios	tenencia	560013	0.0927103	0.366039	2.25776	0.0784284
d2rios	pendiente	2.69E+06	0.203348	0.653228	2.91415	0.26553
dem	tenencia	507325	0.0748753	0.350611	1.89851	0.0108594
dem	pendiente	2.05E+06	0.150691	0.601764	2.65742	0.179377
tenencia	pendiente	4.77E+07	0.72568	0.964056	1.88366	0.0588391

Donde d2cam = distancia a los caminos; d2loc = distancia a las principales localidades; tenencia = propiedad de la tierra; pendiente = pendiente; dem = altitud; d2rios = distancia a los ríos principales.

Se calcularon las probabilidades de transición para cada celda por medio del método de pesos de evidencia. De los seis factores definidos, solo la tenencia de la tierra está en forma binaria, los otros cinco son datos continuos y fueron transformados en variables con rangos.

Las tasas de transición para las siete transiciones analizadas se muestran en la tabla 8. Estas tasas fueron calculadas por medio de una operación de tabulación cruzada entre los mapas de uso/cobertura del suelo inicial (2000) y final (2003). Se observa que la transición con la tasa mayor es la que va de SBC-a a AT (0.0070), mientras que la transición de SBC-a a SBC-sa tiene la menor tasa (0.0018).

Tabla 8 – Matriz de las tasas de transición para La Huacana, 2000-2003

	SBC-c	SBC-sa	SBC-a	AT
SBC-c	0.9934	---	0.0025	0.0041
SBC-sa	---	0.9945	0.0034	0.0022
SBC-a	---	0.0018	0.9912	0.0070
AT	---	---	0.0023	0.9977

En la figura 11 se pueden observar de manera gráfica las mismas tasas y sus transiciones correspondientes.

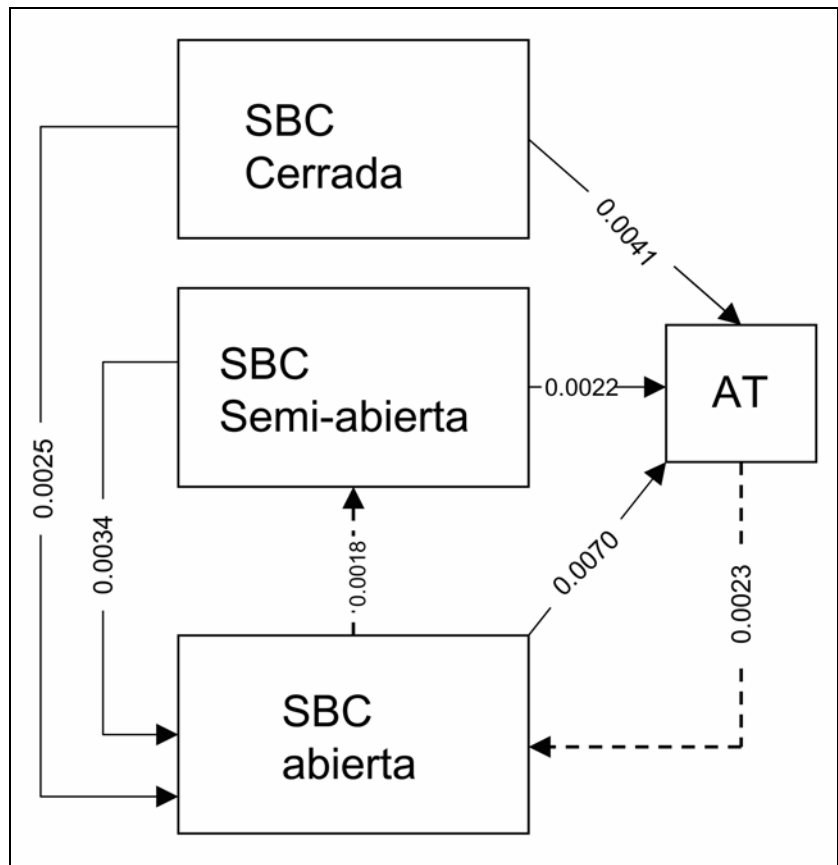


Figura 11 Tasas de las transiciones de cambio de uso/cobertura del suelo en La Huacana en el periodo 2000-2003

Los parámetros que utiliza DINAMICA para la expansión y creación de nuevos parches, así como el porcentaje de cada una de estas dos funciones, se calcularon en ArcView, donde se seleccionaron los polígonos que experimentaron cambio de acuerdo al tipo de transición en el periodo 2000-2003 y el tipo de parche (por expansión o creación de nuevos parches). Los resultados se muestran en la tabla 9.

Tabla 9 – Parámetros para la creación de nuevos parches

Transición	Total		Expansión				Parche	
	Núm. Polígonos	área (ha)	área (ha)	%	Tamaño medio de los parches (ha)	Varianza (ha)	Tamaño medio de los parches (ha)	Varianza (ha)
SBC-c a AT	35	273.3	262	0.95865	8.18	1610066	3.7	26102
SBC-sa a AT	20	79.87	58.39	0.73106	4.86	224260	2.68	38744
SBC-a a AT	29	277.33	264.76	0.95467	10.18	3758404	4.18	1119
SBC-c a SBC-a	9	161.8	45.32	0.2801	6.47	537609	58.24	59871628
SBC-sa a SBC-a	7	122.42	98.14	0.80167	19.62	6313701	12.14	2042
SBC-a a SBC-sa	7	68.57	5.32	0.07758	2.66	137403	12.65	1566258
AT a SBC-a	18	69.26	7.76	0.11204	0.7	34444	8.78	385664

Derivado de la tabla 9, observamos que la mayoría de los cambios se realizan en las transiciones que van de la SBC en sus diferentes estados de conservación hacia AT, representando, en conjunto, el 67% de los polígonos y el 60% del área que experimenta algún tipo de cambio en el periodo 2000-2003. Le siguen en área las transiciones que se dan de los tipos de SBC conservada y semi-abierta hacia el nivel más perturbado de la misma SBC (abierta), con el 13% de los polígonos y el 27% del área. En último lugar están las transiciones que implican recuperación, con el 20% de los polígonos y el 13% del área.

Otro dato interesante es que, en su mayoría, las áreas afectadas por las transiciones que implican degradación, se generaron por la expansión de áreas en dicho estado en la fecha inicial (2000) y, de manera contraria, las transiciones que implican recuperación surgieron en su mayoría como parches nuevos.

4.3.1 Transiciones que implican degradación

Para las cinco transiciones que implican degradación, la distancia a caminos es uno de los factores donde los valores máximo y mínimo de sus pesos de evidencia están más alejados, lo cual indica que es uno de los factores que, de manera más evidente, están relacionados con que se presente la degradación; y una situación similar pasa con la distancia a los asentamientos humanos. Los caminos aparecen como uno de los predictores más fuertes de la deforestación en esta región seca, como ha sido probado en otros casos de deforestación tropical (Kaimowitz y Angelsen 1998). El bosque es convertido a agricultura, plantaciones y pastoreo en donde los caminos y los ríos proveen un fácil acceso.

La cercanía a los principales ríos también aparece como un factor importante que contribuye a la deforestación, y esto tiene sentido si consideramos que la disponibilidad de agua en el área de estudio es muy importante en determinar el uso del suelo, ya que las áreas de pie de ladera y planicies tienen un balance hídrico más favorable para la agricultura que las de mayor pendiente. La tenencia ejidal de las tierras tiende a disminuir la tasa de deforestación.

En la figura 12, se ilustran en rojo los parches con cambios experimentados por la transición de SBC-c a AT, que es la que ocupa mayor área dentro de las transiciones hacia la degradación, además se despliegan las capas de información utilizadas como variables explicativas en el modelo: caminos, poblados, ríos principales, ejidos y pendientes menores a 10° (no fue posible mostrar la altitud porque dificultaba la legibilidad del mapa).

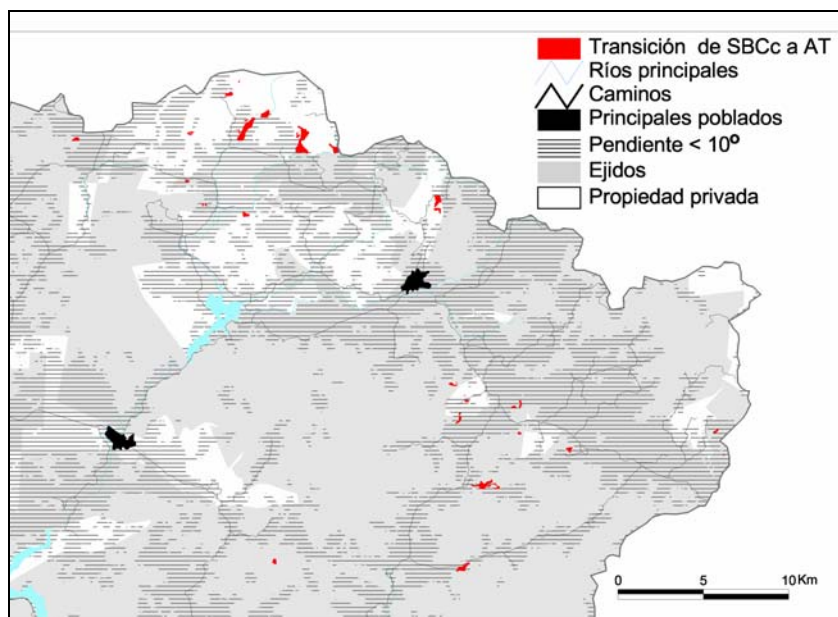


Figura 12 Parches de la transición de SBC-c a AT en el periodo 2000-2003

En la figura 13 se despliegan las gráficas de los pesos de evidencia calculados por DINAMICA para la misma transición (SBC-c a AT). De la observación de ambas figuras, podemos decir que las tendencias descritas anteriormente se cumplen. Aunque, debido tanto a que los parches son pocos como a las excepciones que no

cumplen con esas tendencias, en las gráficas que expresan esos cambios la tendencia no se observa de manera tan lineal.

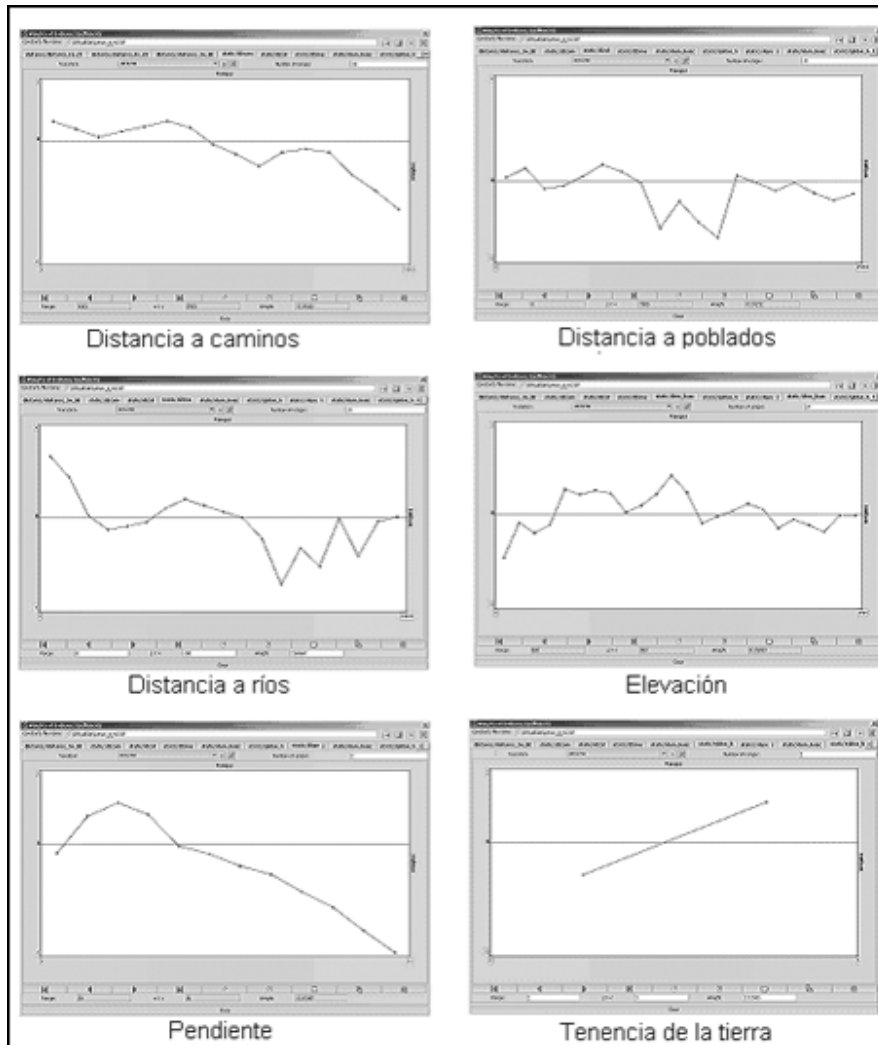


Figura 13 Gráficas de los pesos de evidencia calculados para la transición de SBC-c a AT

4.3.2 Transiciones que implican recuperación

Para las dos transiciones que implican cierto grado de recuperación de la selva, y relacionado con las tierras agrícolas abandonadas, el comportamiento de los factores analizados cambia completamente. Las áreas que exhiben recuperación aparecen lejos de los caminos y de las áreas urbanas; también, estas transiciones suceden lejos de los ríos principales. En relación con la elevación y las pendientes, los últimos rangos son los más importantes. La propiedad privada es favorable a la recuperación de la vegetación, aunque no es tan fuerte su influencia

como en el caso de las transiciones hacia la degradación, esta situación también puede explicarse debido a que la mayor parte de la degradación se experimenta en tierras de propiedad privada y, por lo tanto, es lógico que la recuperación también se dé de manera preponderante en este tipo de propiedad de la tierra. En el caso de los pequeños parches alejados de las vías de comunicación podría tratarse del abandono de cultivos ilícitos.

En la figura 14 se muestran los parches que sufrieron algún tipo de recuperación, y se aprecia que su distribución es más amplia en el municipio, pese a que el tamaño y número es menor.

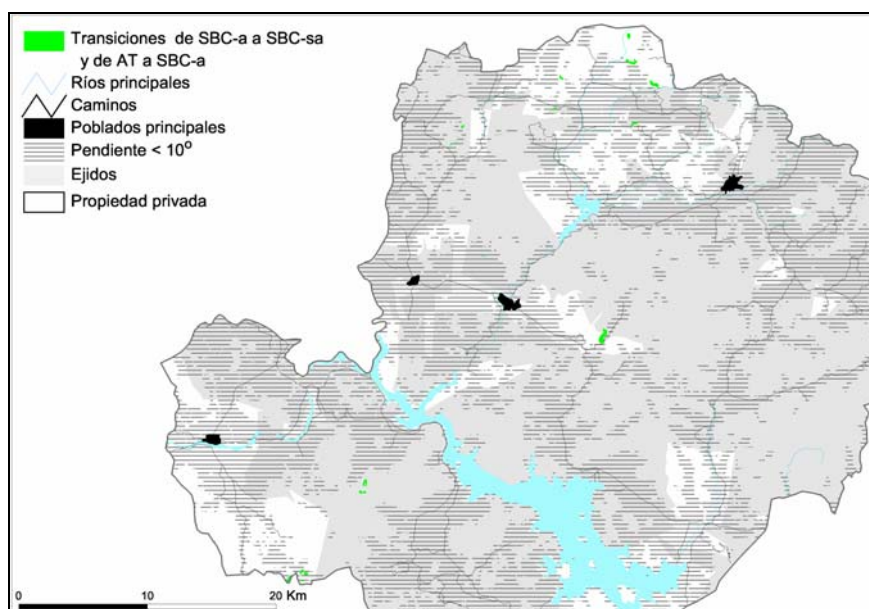


Figura 14 Parches de las transiciones de AT a SBC-sa y de SBC-a a SBC-sa en el periodo 2000-2003

Las gráficas de la figura 15 muestran el comportamiento de los pesos de evidencia para la transición de AT a SBC-a.

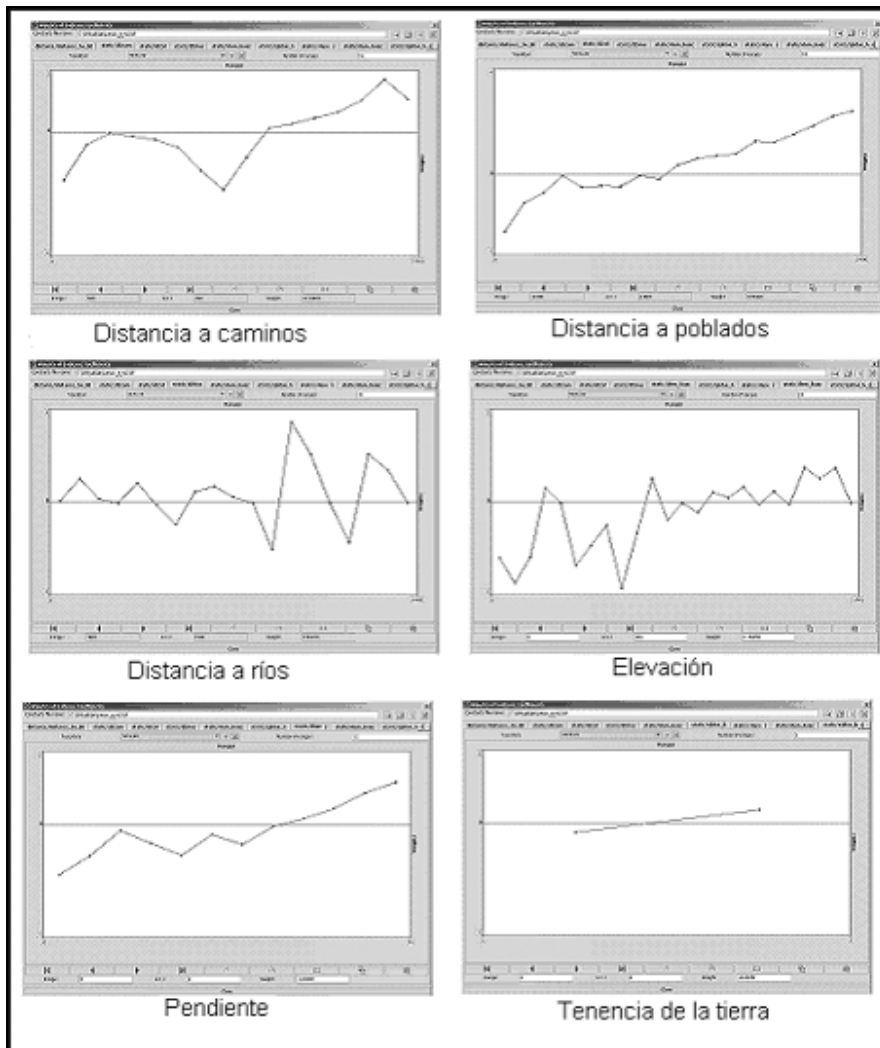


Figura 15 Gráficas de los pesos de evidencia calculados para la transición de AT a SBC-a

4.4 Escenarios al 2015

En la figura 16 se muestra la porción del municipio marcada con un recuadro en la figura 10, en la parte superior se despliega el mapa de uso/cobertura del 2006 (fecha inicial de la simulación), y abajo se muestran los mapas simulados al 2015, de acuerdo a los tres escenarios: tendencial, ganadero y deseable, respectivamente.

La mayor diferencia entre los escenarios se observa en la superficie de la cobertura de agricultura de temporal/pastizal, la cual aumenta notoriamente en el escenario ganadero y disminuye, en menor medida, en el escenario deseable.

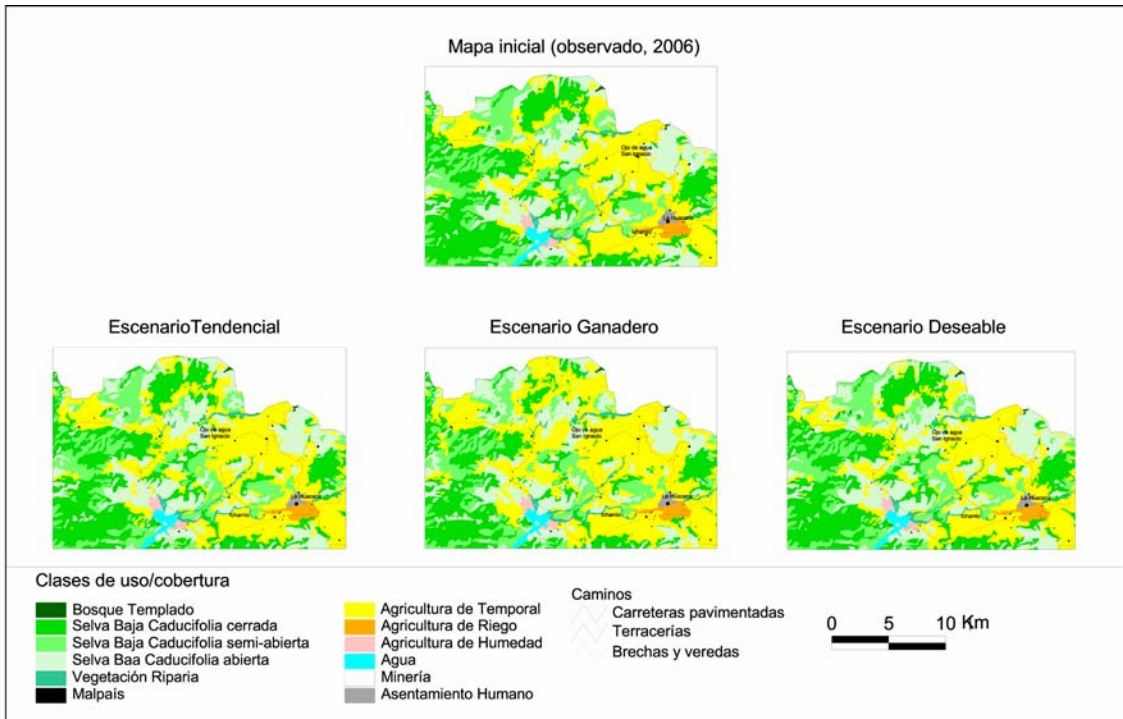


Figura 16 Mapa inicial (2006) y escenarios al 2015

5. Validación y discusión de resultados

Los tres mapas de uso/cobertura del suelo derivados de imágenes de satélite, fueron evaluados con el personal del municipio que tiene un buen conocimiento del área. La clasificación del 2000 también se evaluó usando fotografía aérea digital de alta resolución, mientras que la clasificación de 2006 se evaluó con los datos de campo. Aunque estas aproximaciones de evaluación no permitieron obtener un valor de fiabilidad estadísticamente robusto, la confiabilidad de los mapas se consideró satisfactoria.

Con la intención de estimar las simulaciones, usamos los modelos tendencial y ganadero, calibrados en el periodo 2000-2003, para producir dos mapas de 2006 (la figura 18 muestra el mapa simulado de 2006 usando el modelo tendencial). Estos dos mapas simulados fueron comparados con el mapa observado de 2006 (figura 17) con el método difuso de similitud recíproca, usando ventanas de 1 a 73 celdas. Basado en la ventana de una celda, esta evaluación es “dura”, ya que sólo las coincidencias exactas de los cambios entre los mapas de uso/cobertura del suelo simulado y observado son consideradas como correctas. Al contrario, basados en la ventana más grande (73 celdas equivale a más de dos kilómetros), la estimación de la coincidencia tolera cambios de posición entre los parches de cambio simulados y observados. La figura 19 muestra el índice de similitud difusa en función del tamaño de la ventana (posición difusa) para los mapas de 2006 derivados de los escenarios tendencial y ganadero respectivamente. Ningún escenario fue capaz de predecir la posición exacta del cambio (con una ventana de tamaño de uno, el índice es cercano a cero). Las variables explicativas no controlan la distribución espacial del cambio estrictamente y sólo una pequeña parte del área que cuenta con todas las condiciones para cambiar realmente cambia. Cuando se incrementa la tolerancia del error de posición, el índice aumenta de manera importante y muestra que el modelo fue capaz de identificar la localización del cambio de manera burda. El escenario ganadero tuvo un mejor desempeño, ello principalmente debido a que la cantidad de cambio fue mayor y por lo tanto más cercana al cambio observado durante 2003-2006, que la cantidad

calculada para el escenario tendencial. No obstante, todos los paisajes son realistas en términos de los patrones espaciales de cambio: el tamaño, forma y distribución de los parches de cambio simulados son similares a los observados.

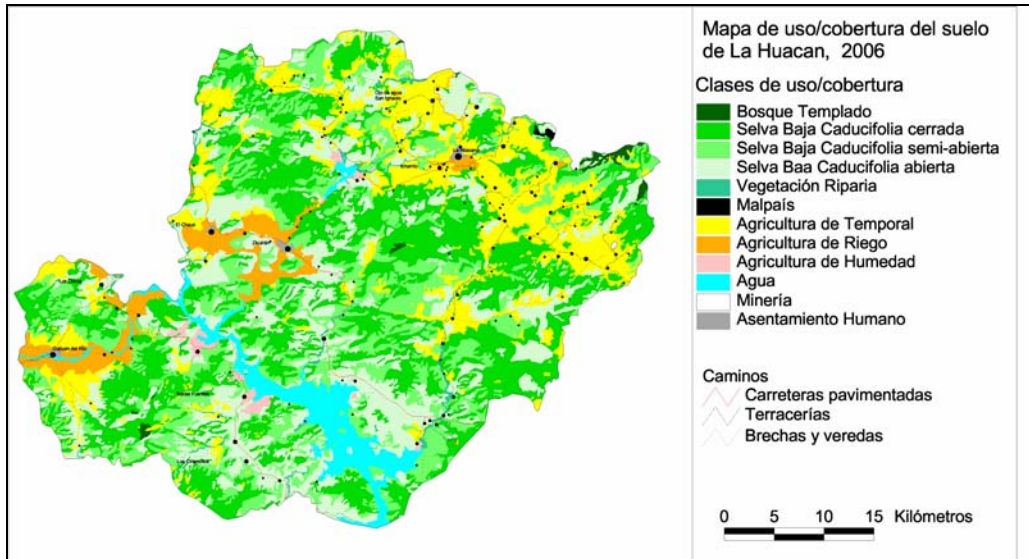


Figura 17 Mapa de uso/cobertura del suelo de La Huacana, 2006

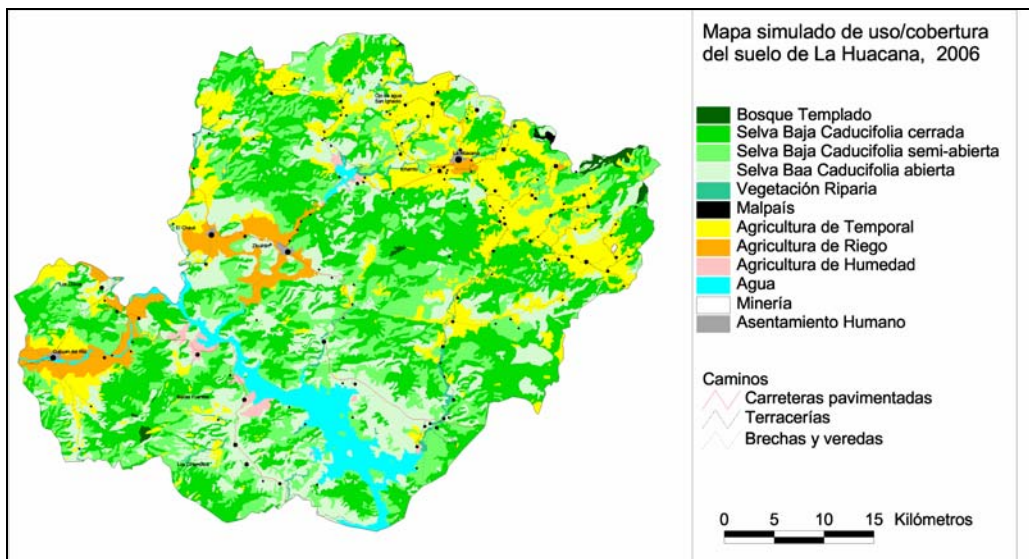


Figura 18 – Mapa simulado de uso/cobertura del suelo de La Huacana, 2006

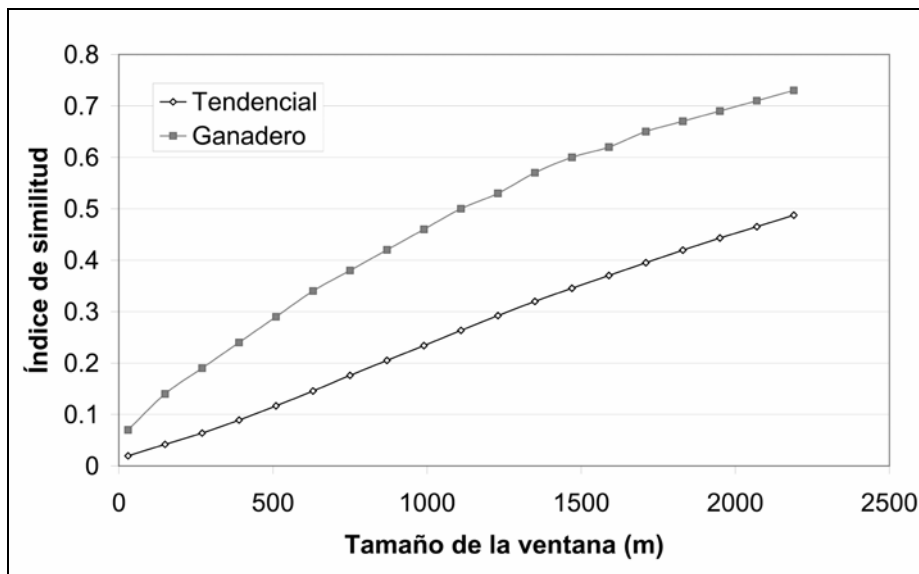


Figura 19 Índice de similitud difusa en función del tamaño de la ventana (posición difusa)

Finalmente, cabe mencionar que, derivado de la observación de los parches de cambio, se aprecia que las condiciones (o factores analizados) en el sur, respecto a las del norte y centro son muy diferentes. Por ello sería interesante correr sub-modelos, quizá a nivel de sub-cuenca y es posible que, de esta forma, los pesos de evidencia de manera automática describan mejor la influencia de los factores en cada caso.

6. Conclusiones y perspectivas

Los mapas generados de uso/cobertura del suelo del municipio de La Huacana, constituyen un aporte importante para alimentar estudios posteriores de planificación, tales como el Ordenamiento Ecológico.

Los métodos participativos permiten contar con información que de otra forma es difícil conocer y, junto con el conocimiento científico y el uso de herramientas técnicas; es posible construir productos, en este caso escenarios de cambio de uso del suelo, que apoyan la toma de decisiones a nivel local.

Dentro de los aspectos que, la aplicación del modelo reveló como elementos importantes que ayudan a comprender la dinámica del cambio de uso del suelo en esta región seca, están para el caso de las transiciones que implican degradación: la cercanía a vías de comunicación, a asentamientos humanos y a corrientes de agua, así como de manera relevante la propiedad privada de la tierra aparece como un factor que promueve la deforestación. Para el caso de las transiciones en el sentido de la recuperación, los factores que más influyen en su ocurrencia son las pendientes y elevaciones mayores; y la lejanía a caminos, localidades y ríos principales; en el caso de la propiedad ejidal ésta aparece como un factor con tendencia a ser limitante de la deforestación.

Los mapas simulados de uso/cobertura del suelo para el 2015, derivados de los tres escenarios de cambio, fueron elaborados usando un modelo espacialmente explícito y, de acuerdo a su validación (índice fuzzy), muestran una distribución aceptable de los usos/coberturas en el municipio, tomando en cuenta tres configuraciones de posibles tendencias futuras: i) el escenario tendencial (la cantidad y patrones de cambio son los mismos que durante el periodo 2000-2003, periodo de calibración), ii) el escenario ganadero (pérdida de cohesión de los ejidos e incremento de la conversión de la selva baja caducifolia en pastizales para el ganado) y, iii) el escenario deseable (promoción de ganadería sustentable e implementación de áreas protegidas).

Los diferentes escenarios no presentan cambios dramáticos debido al corto tiempo de la simulación (2006-2015) y porque la mayoría del área permanece sin cambio. Basado en la comparación de las simulaciones entre 2003 y 2006 y el mapa observado de 2006, el modelo no predice la localización de los cambios futuros de manera exacta, pero si identifica las áreas de cambio y simula de manera realista el paisaje respecto al patrón de cambio espacial de manera aproximada.

La obtención de mapas realistas simulados puede ser muy importante para ciertos propósitos, tales como su presentación a las comunidades para apoyar la toma de decisiones o la estimación de cambio sobre hábitat fragmentados. La investigación hecha sobre la evaluación del desempeño de los modelos espacialmente explícitos, está principalmente enfocada en la coincidencia espacial entre los mapas observado y simulado. Se requiere investigación para evaluar el modelo en cuanto a su capacidad de predecir el patrón espacial de paisajes futuros.

La aproximación elegida para calibrar el modelo puede considerarse una combinación entre un modelo “supervisado”, con el establecimiento manual del conocimiento base, y aproximaciones “automáticas” que derivan de las relaciones entre cambios y variables explicativas sólo de los cambios observados durante el periodo de calibración. Dado que el modelo fue calibrado en un periodo corto (3 años), la cantidad de cambio fue baja y, por lo tanto, una aproximación puramente estadística puede ser interpretada erróneamente debido a su sensibilidad a eventos atípicos. Por ejemplo, en el caso de que ocurra una tala grande a cierta distancia de un camino, un modelo basado en la aproximación automática aprenderá que la probabilidad de cambio a esa distancia es muy alta, mientras que se espera que una relación progresiva entre la probabilidad de deforestación y la distancia a los caminos represente mejor la tendencia general. Una edición manual de los pesos de evidencia permite reducir el sesgo debido a la falta de representatividad estadística. Además, la edición de los pesos de evidencia permite integrar conocimiento experto y la elaboración de escenarios.

Tanto los mapas interpretados como los simulados serán entregados a las autoridades municipales para su análisis, y esperamos que sirvan como insumo para promover la discusión sobre la política ambiental en el municipio.

Bibliografía

Almeida, C. M., Batty, M., Vieira Monteiro, A. M., Câmara, G., Soares-Filho, B. S., Cerqueira, G. C. y Lopes Pennachin, C. (2003). Stochastic cellular automata modeling of urban land use dynamics: empirical development and estimation. *Computers, Environment and Urban Systems* 27(5): 481-509.

Almeida, C. M., Batty, M., Vieira Monteiro, A. M., Câmara, G., Soares-Filho, B. S., Cerqueira, G. C. y Lopes Pennachin, C. (2005). GIS and remote sensing as tools for the simulation of urban land-use change. *International Journal of Remote Sensing* 26(4): 759 - 774.

Arroyo-Mora, J. P., Sanchez-Azofeifa, G. A., Kalacska, M. E. R., Rivard, B., Calvo-Alvarado, J. C. y Janzen, D. H. (2005). Secondary Forest Detection in a Neotropical Dry Forest Landscape Using Landsat 7 ETM+ and IKONOS Imagery1. *Biotropica* 37(4): 497-507.

Bautista, F., Delgado, M. d. C., Rivas, H., Paez, R. y Carmona, E. (2008). IV.3- Análisis Agro-Climático y Edáfico en: Priego, A. y G. Bocco compiladores. Bases para el Ordenamiento Ecológico de la Región Sierra-Costa de Michoacán. Informe preparado para la Secretaría de Urbanismo y Medio Ambiente del Gobierno del Estado de Michoacán de Ocampo.

Bell, E. J. e Hinojosa, R. C. (1977). Markov analysis of land use change: Continuous time and stationary processes. *Socio-Economic Planning Sciences* 11(1): 13-17.

Bocco, G., Mendoza, M. y Masera, O. (2001). La dinámica del cambio del uso del suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación. *Investigaciones Geográficas* 44: 18-38.

Bonham-Carter, G. F. (1994). Geographic information systems for geoscientists: Modelling with GIS. New York, Pergamon.

Briassoulis, H. (2000). Analysis of land use change: theoretical and modeling approaches. In *The Web Book of Regional Science*.(www.rri.wvu.edu/regscweb.htm). ed., S. Loveridge. Regional Research Institute, West Virginia University. Retrived September 2006

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.

CONAPO (2001). Índice de marginación por localidad, 2000. México, CONAPO.

CONAPO (2002). Índice de intensidad migratoria México-Estados Unidos, 2000. México, CONAPO.

CONAPO (2006). Índice de marginación por localidad, 2005. México, CONAPO.

Costanza, R. (1989). Model goodness of fit: A multiple resolution procedure. *Ecological Modelling* 47(3-4): 199-215.

Couturier, S., Mas, J. F., Cuevas, G. B., J., Vega, A. y Tapia, V. (2007). A thematic-focused accuracy assessment of land cover maps for highly biodiverse regions. *Engineering and Remote Sensing* (in press).

Cuevas, G. (2007). The applicability of a stochastic-dynamic model of land use change in a Mexican dry tropical region. Tesis de Master of Science in Geo-information Science and Earth Observation, ITC, Enschede, Netherlands

Chermack, T. J. (2007). Disciplined imagination: Building scenarios and building theories. *Futures* 39(2007): 1-15.

Chowdhury, R. R. (2006). Driving forces of tropical deforestation: The role of remote sensing and spatial models. *Singapore Journal of Tropical Geography* 27(1): 82-101.

FAO (1996). Forest resources assessment 1990. Survey of tropical forest cover and study of change processes. Food and Agriculture Organization, FAO forestry paper. **130**: 152.

Geist, H. J. y Lambin, E. F. (2001). What drives tropical deforestation? A meta-analysis of proximate and underlying causes of deforestation based on subnational case study evidence. In <http://www.geo.ucl.ac.be/LUCC/pdf/LUCC%20Report%20-%20Screen.pdf>. ed., L. R. S. N. 4. LUCC International Project Office, University of Louvain Department of Geography Retrieved March 2007

Hagen, A. (2003). Fuzzy set approach to assessing similarity of categorical maps. *International Journal of Geographical Information Science* 17: 235-249.

HALH (2005). Primer Informe de Gobierno Municipal, La Huacana, Michoacán 2005-2007, H. Ayuntamiento de La Huacana (HALH), Michoacán, México.

Heiko, B., Braun, P. W. y Kohler, W. (1998). Cellular automata models for vegetation dynamics. *Ecological Modelling* 107(2-3): 113-125.

INEGI (2001). XII Censo general de población y vivienda 2000. Aguascalientes, México, INEGI.

INEGI (2006). II Conteo de población y vivienda 2005. Aguascalientes, México, INEGI.

Kaimowitz, D. y Angelsen, A. (1998). Economic Models of Tropical Deforestation: A Review. Bogor, Indonesia, Centre for International Forestry Research.

López, E., Bocco, G., Mendoza, M., Velazquez, A. y Aguirre-Rivera, R. J. (2006). Peasant emigration and land-use change at the watershed level: A GIS-based approach in Central Mexico. *Agricultural Systems* 90(1-3): 62-78.

Lu, D., Mausel, P., Brondizio, E. y Moran, E. (2004). Change detection techniques. *International Journal of Remote Sensing* 25: 2365-2401.

Mas, J.-F., Velazquez, A., Diaz-Gallegos, J. R., Mayorga-Saucedo, R., Alcantara, C., Bocco, G., Castro, R., Fernandez, T. y Perez-Vega, A. (2004). Assessing land use/cover changes: a nationwide multirate spatial database for Mexico. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 5(4): 249-261.

Murphy, E., Dingwall, R., Greatbatch, D., Parker, S. y Watson, P. (1998). Qualitative research methods in health technology assessment: a review of the literature. *Health Technology Assessment* 2(16): 276.

Paegelow, M. y Camacho-Olmedo, M. T. (2005). Possibilities and limits of prospective GIS land cover modelling - a compared case study: Garrotxes (France) and Alta Alpujarra Granadina (Spain). *International Journal of Geographical Information Science* 19(6): 697 - 722.

Pontius, R. G. J. (2002). Statistical Methods to Partition Effects of Quantity and Location During Comparison of Categorical Maps at Multiple Resolutions. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 15(1): 77-100.

Power, C., Simms, A. y White, R. (2001). Hierarchical fuzzy pattern matching for the regional comparison of land use maps. *International Journal of Geographical Information Science* 15: 77-100.

Rzedowski, J. (1986). Vegetación de México. México, Limusa.

Sheppard, S. R. J. (2005). Landscape visualisation and climate change: the potential for influencing perceptions and behaviour. *Environmental Science & Policy* 8(6): 637-654.

Soares-Filho, B. S., Alencar, A., Nepstad, D., Cerqueira, G. C., Vera, M. y Rivero, S. (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. S., Cerqueira, G. C. y Lopes Pennachin, C. (2002). DINAMICA--a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. *Ecological Modelling* 154(3): 217-235.

Stock, C., Bishop, I. D. y Green, R. (2007). Exploring landscape changes using an envisioning system in rural community workshops. *Landscape and Urban Planning* 79(3-4): 229-239.

Trejo, I. y Dirzo, R. (2000). Deforestation of seasonally dry tropical forest: a national and local analysis in Mexico. *Biological Conservation* 94(2): 133-142.

Trejo, R. I. (1998). Distribución y diversidad de selvas bajas de México: relaciones con el clima y el suelo. Tesis de Doctorado, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México

Vidal, R. (2005). Las regiones climáticas de México. México, Instituto de Geografía, UNAM.

White, R. y Engelen, G. (2000). High-resolution integrated modelling of the spatial dynamics of urban and regional systems. *Computers, Environment and Urban Systems* 24(5): 383-400.