
Modelado de cambios de cobertura y uso de suelo: un estudio de caso en el Estado de México.**Modeling changes in coverage and land use: a case study in the Estado de México.**

¹Raúl Camacho Sanabria, ²José Manuel Camacho Sanabria, ³Ricardo Camacho Sanabria,
⁴José Carlos Camacho Reyes.

¹Facultad de Química, UAEM. Paseo Colón S/N, 50120, Toluca, Estado de México, México. Tel: 7228749197. Correo electrónico: r_3camacho@hotmail.com.

²CONACYT – Universidad de Quintana Roo, División de Ciencias e Ingeniería. Boulevard Bahía S/N, 77019, Chetumal, Quintana Roo, México. Tel: 983 835 0300. Correo electrónico: jmanuelcs@live.com.mx

³Facultad de Geografía, UAEM. Paseo Universidad S/N, 50110, Toluca, Estado de México, México. Tel: 7225511032. Correo electrónico: richar_fay@hotmail.com

⁴Facultad de Química, UAEM. Paseo Colón S/N, 50120, Toluca, Estado de México, México. Tel: 7226631817. Correo electrónico: carlos_josh@live.com.mx

RESUMEN. El área de estudio se localiza al sur del municipio de Villa Guerrero, Estado de México. Es una localidad rural-campesina ubicada en una zona de transición ecológica. La presente investigación tiene por objetivo desarrollar un modelo de cambios de cobertura y uso de suelo (CCUS), mediante mapas de uso de suelo y vegetación de los años 2000, 2007 y 2015, además, del manejo de variables cartográficas explicativas de proximidad, físico-geográficas y sociales-económicas-ambientales por medio de la herramienta DINAMICA EGO. Los CCUS se modelaron para el año 2025 bajo dos escenarios: tendencial y expansión de invernaderos. La agricultura tecnificada prevé los mayores cambios, en el año 2015 su extensión era de 19 ha, en el escenario tendencial aumentó a 35 ha y en el escenario de expansión de invernaderos se incrementará a 47 ha. Los cambios más significativos se relacionan con el proceso de conversión entre sistemas agrícolas, puesto que, la agricultura de temporal y de riego fue la cobertura que presentó mayores pérdidas de superficie, mientras que la agricultura tecnificada controlada fue la categoría que obtuvo mayores ganancias en cuanto extensión territorial.

Recibido: Agosto, 2019.

Aprobado: Octubre, 2019.

ABSTRACT. The area of study of this research is located in a region in the south of Villa Guerrero, a town in the State of Mexico. This place is a rural land located in a zone of ecological transition. The main objective of this work is develop a model of of land use/cover changes (LUCC), by using land cover and vegetation maps of the years 2000, 2007 and 2015, in addition, the management of cartographic variables that are explanatory of proximity, physical-geographica and social-economic-environmental by means of the tool DYNAMIC EGO. The LUCC for 2025 were modelled under two scenarios: trend and expansion of greenhouses. The technified agriculture foresees the greatest changes, in the year 2015 its extension was of 19 ha, in the tendency scenario it increased to 35 ha and in the scenario of expansion of greenhouses will increase to 47 ha. The most significant changes are related to the conversion process between agricultural systems, since the agriculture of temporary and irrigation was the coverage that presented greater losses of surface, whereas the controlled technified agriculture was the category that obtained greater gains in respect territorial expansión.

Palabras claves: DINAMICA EGO, Estado de México, Modelo Espacial, Tasas de cambio, Variables cartográficas.

Keywords: DINAMICA EGO, Estado de México, Spatial Model, Rates of Change, Cartographic Variables.

INTRODUCCIÓN

Los cambios de cobertura y uso del suelo (CCUS) contribuyen de forma significativa a la pérdida de biodiversidad, la emisión de gases a efecto invernadero y al deterioro ambiental. Las actividades económicas que practican las distintas sociedades del mundo juegan un papel importante en el proceso de cambio entre las diferentes cubiertas de uso de suelo y vegetación.

México, a partir del Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN) se insertó en una dinámica de competitividad económica, con la finalidad de impulsar un sistema

agrícola comercial. En este contexto, a partir del año 2000 comenzó a ser notoria la presencia de sistemas agrícolas tecnificados controlados (invernaderos) con fines comerciales (orientados a la producción de hortalizas y flor de corte) en el Estado de México (Vallejo *et al.*, 2013). Esta actividad económica ha ocasionado severos cambios o transformaciones en los paisajes naturales y coberturas vegetales que caracterizan a esta entidad.

Actualmente, en Progreso Hidalgo, localidad del municipio de Villa Guerrero, Estado de México la pérdida de la rentabilidad y la capacidad productiva agrícola está ocasionando cambios en las coberturas de uso de suelo y vegetación (permanencia, disminución o expansión), uno de ellos es la implementación de la agricultura tecnificada controlada. Dicha transformación está enfocada al establecimiento, desarrollo y mecanización de productos con fines comerciales, provocando con ello severos impactos en los componentes del ambiente, sobre todo en el aire. Con base en lo anterior, es fundamental que los especialistas en la temática, en conjunto con las autoridades responsables en el área, trabajen en delimitar y plantear estrategias que ayuden al manejo y control de los procesos de cambio, debido a que una de sus consecuencias ha sido, el efecto adverso que genera en la temperatura ambiental en Progreso Hidalgo. Por lo cual, es trascendental realizar un análisis multitemporal de los procesos de cambio que se producen en las coberturas y usos del suelo de la localidad, para construir escenarios prospectivos y simular la tendencia de dichos cambios.

El análisis y la modelación de los cambios de cobertura y uso de suelo en un sistema de información geográfica (SIG) son las principales herramientas y contribuidores al impulso de estudios que tienen como principales fines: a) explicar y evaluar, desde un enfoque cuantitativo, la dinámica de cambios de las coberturas y usos del suelo de un determinado territorio y dimensión temporal; b) identificar y predecir las áreas más propensas a cambiar; c) comprender los procesos que originan los cambios, asociados al uso, manejo y la aplicación de variables espaciales explicativas (ambientales, geográficas, económicas, sociales, etc.) y; d) realizar modelos de cambio para la construcción de escenarios prospectivos (Veldkamp & Lambin, 2001; Xiang & Clarke, 2003).

El presente estudio tiene como propósito desarrollar un modelo espacial de cambios de cobertura y uso de suelo, mediante mapas de uso de suelo y vegetación de los años 2000, 2007 y 2015, además, del manejo de variables cartográficas explicativas, por medio de la herramienta DINAMICA EGO.

METODOLOGÍA

Área de estudio

Progreso Hidalgo se localiza al sur de Villa Guerrero en el Estado de México, entre las coordenadas 18° 49' 34" y 18° 52' 30" de latitud norte y 99° 36' 30" y 99° 37' 32" de longitud oeste. Se ubica en una zona de ecotono o de transición ecológica que se caracteriza por una amplia diversidad biológica. Además, las condiciones ambientales que la describen favorecen la presencia de diversos sistemas agrícolas (Fig. 1).

Progreso Hidalgo es una comunidad rural-campesina con una superficie de 826 hectáreas aproximadamente. Limita al norte y oriente con localidades de Zumpahuacán; al sur, con las barrancas formadas por los ríos Calderón, Nenetzingo, San Jerónimo y Tenancingo, y con algunos espacios del municipio de Tonatico; y al poniente, con barrancas y comunidades del municipio de Ixtapan de la Sal (Ramírez y Juan, 2008).

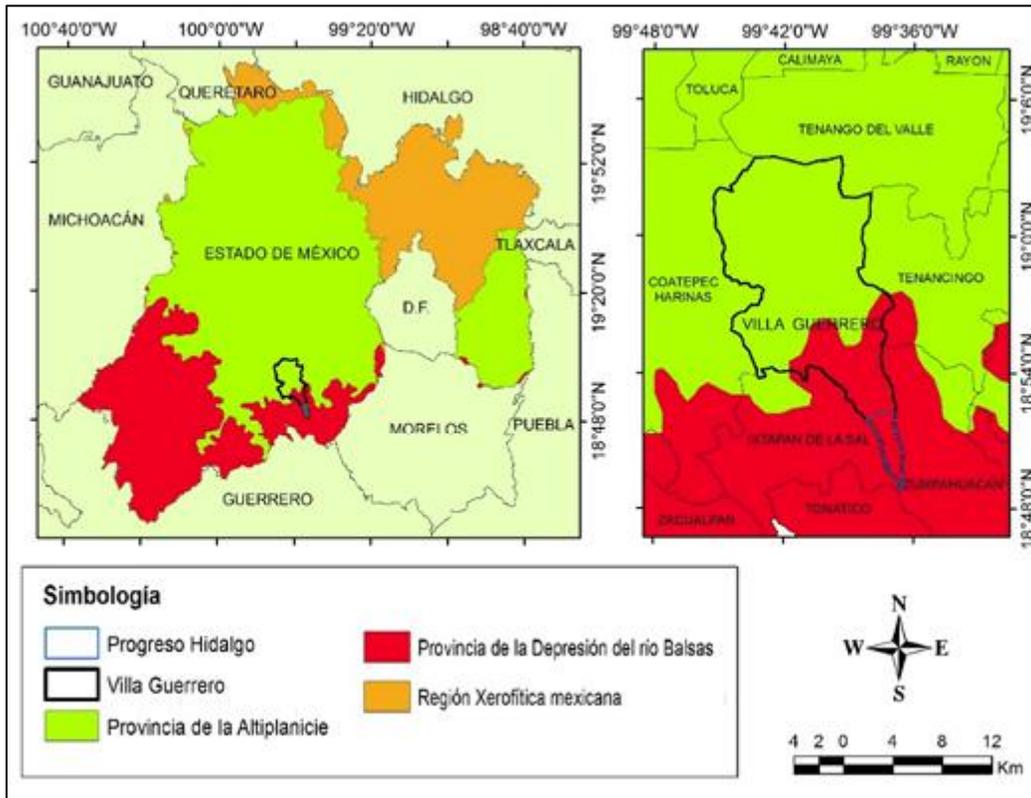


Figura 1. Ubicación geográfica de Progreso Hidalgo en el contexto estatal. Fuente: Elaboración propia con base en Halffter (1964), INEGI (2015).

Material es

Para la construcción del modelo de cambios de cobertura y uso de suelo, se utilizaron: a) los mapas de uso de suelo y vegetación de los años 2000, 2007 y 2015 obtenidos mediante el método de interpretación visual interdependiente (FAO, 1996), aplicado a dos ortofotos (marzo 2000 y abril 2007, INEGI) y una imagen de satélite (diciembre 2015, Google Earth). Dichos mapas fueron sometidos al proceso de evaluación de la confiabilidad temática para conocer su grado de certeza y fiabilidad (Mas *et al.*, 2003). Para la evaluación de los sitios de verificación correspondientes a los años 2000, 2007 y 2015 se utilizaron dos ortofotos digitales (2000 y 2007) y una imagen de alta resolución espacial de Google Earth (2015), insumos utilizados previamente para la elaboración de los mapas de dichos años. Además, fue necesario recurrir a un especialista (externo) en la temática, con el propósito de validar los sitios de muestreo mediante la interpretación visual y el conocimiento de experto (Congalton *et al.*, 1998) y; b) variables cartográficas de proximidad (a nivel píxel), físicogeográficas y sociales-económicas-ambientales. El Cuadro 1 integra los insumos cartográficos utilizados para el desarrollo del modelo de cambios.

La modelación se obtuvo mediante la herramienta geoespacial DINAMICA EGO, un software de modelación medio-ambiental (Soareas-Filho *et al.*, 2009) y operado por diversos investigadores en numerosos estudios enfocados a modelados de procesos de deforestación tropical (Maeda *et al.*, 2011; Mas & Flamenco, 2011) y de crecimiento urbano (Bahadur & Murayama, 2011; Godoy & Soares-Filho, 2008). La revisión de programas para la modelación de cambios de cobertura y uso de suelo recurrentemente citado en la literatura, expresa que, DINAMICA es adecuado por su flexibilidad, ya que integra la mayoría de los operadores de un SIG y permite el desarrollo de modelos sofisticados (Mas & Couturier, 2011; Mas & Flamenco, 2011).

Cuadro 1. Variables cartográficas para la construcción del modelo.

Categoría	Insumo cartográfico	Escala o resolución	Descripción	Fuente
Temática (Categoría o discreta)	Mapa de uso de suelo y vegetación (2000, 2007 y 2015)	1:45,000	Categorías: a) agricultura de temporal y de riego; b) bosque; c) cuerpos de agua; d) asentamientos humanos y; e) agricultura tecnificada controlada	Elaboración propia (interpretación visual interdependiente de: a) ortofotos de los años 2000 y 2007 y; b) imagen de satélite de google earth 2015)

Sociales-económicas-ambientales (Categoría o discreta)	Programas gubernamentales	1:45,000	Categorías: a) solicitaron; b) se solicitará y; c) no se solicitará	Elaboración propia mediante trabajo de campo 2016
	Accesibilidad	1:45,000	Categorías: a) norte; b) centro y; c) sur	Elaboración propia mediante trabajo de campo 2016
	Cantidad de producción en toneladas	1:45,000	Categorías: a) 0-15 ; b) 15-30 y; c) 30-45	Elaboración propia mediante trabajo de campo 2016
	Condiciones socio-ambientales	1:45,000	Categorías: a) protección de cultivos (lluvia y granizada) ; b) Mayor producción y; c) Mayor remuneración	Elaboración propia mediante trabajo de campo 2016
	Estado y condición del suelo	1:45,000	Categorías: a) deteriorado; b) baja calidad y; c) buena calidad	Elaboración propia mediante trabajo de campo 2016
De proximidad a nivel pixel (Continua)	Distancia a vialidades	1:45,000	Distancia euclidiana a vialidades	Elaboración propia con base en INEGI (2013)
	Distancia a invernaderos	1:45,000	Distancia euclidiana a invernaderos	Elaboración propia
Físico-geográficos (Continua)	Pendiente	Pixeles de 15 m	Pendientes obtenidas a partir del MDE	Elaboración propia con base en INEGI (2013)
	Modelo Digital de Elevación (MDE)	Pixeles de 15 m	Continuo de elevaciones mexicano	INEGI (2013)

Tasas de cambio de cobertura y uso del suelo

Para analizar los procesos de cambio ocurridos en las coberturas y usos del suelo de Progreso Hidalgo, se determinaron tasas anuales de cambio que comprenden los periodos 2000-2007 y 2007-2015; esto a partir de las superficies correspondientes a las coberturas y usos del suelo que se encuentran representadas espacialmente en los mapas. Además, se consideró la superficie corregida de cada una de las categorías de análisis obtenida mediante el método de Card (1982). Las tasas de cambio se calcularon con base en la ecuación de la FAO (1996):

$$t = (S2 / S1)^{1/n} - 1$$

Donde:

t = Tasa de cambio (se multiplica por 100 para expresarse en porcentaje)

S1 = Superficie de un tipo dado de cobertura/uso del suelo en la fecha 1

S2 = Superficie de la misma cobertura/uso del suelo en la fecha 2

n = Número de años transcurridos entre las dos fechas

Construcción del modelo de cambios de cobertura y uso de suelo

De acuerdo a Mas & Flamenco (2011), para la construcción del modelo dinámico de cambios fue necesaria la ejecución de las siguientes etapas o procesos:

Calibración. Esta etapa consistió en: a) la elaboración de la matriz de cambio. Los mapas de uso de suelo y vegetación de los años 2000 y 2007 se superpusieron para adquirir la matriz de probabilidad de cambio (matriz de Markov) de las coberturas de análisis, mediante el método de cadenas de Markov (Paegelow & Camacho, 2008; Eastman, 2009). Dicha matriz pertenece a la tasa de probabilidad de cambio de un periodo de 7 años (2000-2007) y las tasas de probabilidad de cambio anuales, mismas que permitieron realizar las proyecciones de los cambios de cobertura y usos de suelo; b) cálculo de rangos (transformación de variables continuas a categóricas). Debido a que los pesos de evidencia solo se pueden calcular para variables categóricas, fue imprescindible categorizar las variables continuas (MDE, pendiente, distancia a caminos y distancia a invernaderos) mediante rangos o intervalos (Cuadro 2); c) cálculo de pesos de evidencia. Mediante el método de pesos de evidencia (Bonham-Carter, 1994) integrado en la herramienta DINAMICA EGO se obtuvo la relación entre las diferentes variables cartográficas explicativas y la probabilidad de cambio. Los pesos de evidencia fueron calculados y modificados para la transición de agricultura (temporal y riego) a agricultura tecnificada controlada con base en el conocimiento de experto y; d) análisis de la correlación entre mapas. Para el cálculo de la probabilidad condicional, es necesario que las variables utilizadas como insumos en la construcción del modelo sean independientes espacialmente (Bonham-Carter, 1994). Dichas variables fueron verificadas y discriminadas con base en el índice de Joint Information Uncertainty con límite de tolerancia de 0.35 (Almeida *et al.*, 2003).

Cuadro 2. Categorización de variables continuas para la construcción del modelo

Variable continua	Intervalo	Descripción de la transición	Tipo de transición o proceso
Distancia a carreteras	0 - 500	De agricultura a agricultura tecnificada controlada	Conversión agrícola
Distancia a invernaderos	0 - 1600		
Pendientes	0 - 75		
MDE	0 - 300		

Simulación. Esta fase se fundamenta en: a) el cálculo y mapeo de probabilidades. Con base en los pesos de evidencia y las variables explicativas (de proximidad a nivel píxel, físico-geográficas y sociales-económicas-ambientales) se elaboró un mapa de probabilidad para cada transición. Los mapas resultantes asociados a la matriz de transición anual (calibrada para un periodo de 7 años 2000-2007), dieron como producto mapas prospectivos de cambio de usos de suelo y vegetación para el año 2015 y; b) el modelo de simulación de cambios de cobertura y uso de suelo. Dicho modelo fue construido en DINAMICA EGO mediante el mapa de probabilidad y autómatas celulares (los cambios modelados obtienen una configuración espacial realista), denominados, *expander* (simula cambios por expansión) y *patcher* (genera nuevos parches de cambio) [Soares-Filho *et al.*, 2002]. Los parámetros que requiere esta herramienta para la expansión y creación de nuevos parches (tamaño promedio, varianza e isometría) se obtuvieron en el software ArcMap 10.2.2 (Environmental Systems Research Institute [ESRI], 2012).

Validación. La evaluación del modelo se llevó a cabo mediante un análisis comparativo entre el mapa USV (2015) y el mapa simulado (2015). La comparación se realizó por medio del método de similitud difusa que permite manipular niveles distintos de tolerancia (tamaños de ventana), para identificar los casos en los que no existe coincidencia perfecta entre la ubicación de las áreas de cambio observadas y simuladas (Hagen, 2003).

Construcción de escenarios. Se proyectaron dos escenarios para el año 2025: a) tendencial, que ocupa las tasas anuales (matriz de cambio o de Markov), el periodo de calibración (2000-2007) y el periodo simulado (2007-2015) y; b) expansión de invernaderos, que supone un aumento en las tasas de expansión de la agricultura tecnificada controlada, producto del establecimiento, desarrollo y mecanización de productos con fines comerciales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los mapas de USV (2000, 2007 y 2015) de Progreso Hidalgo (Figura 2) sometidos al proceso de evaluación temática, expresan una fiabilidad global mayor a 99%, valor que rebasa el porcentaje mínimo permitido para la validación cartográfica que corresponde a 80% (; Mas *et al.*, 2003; Mas & Couturier, 2011).

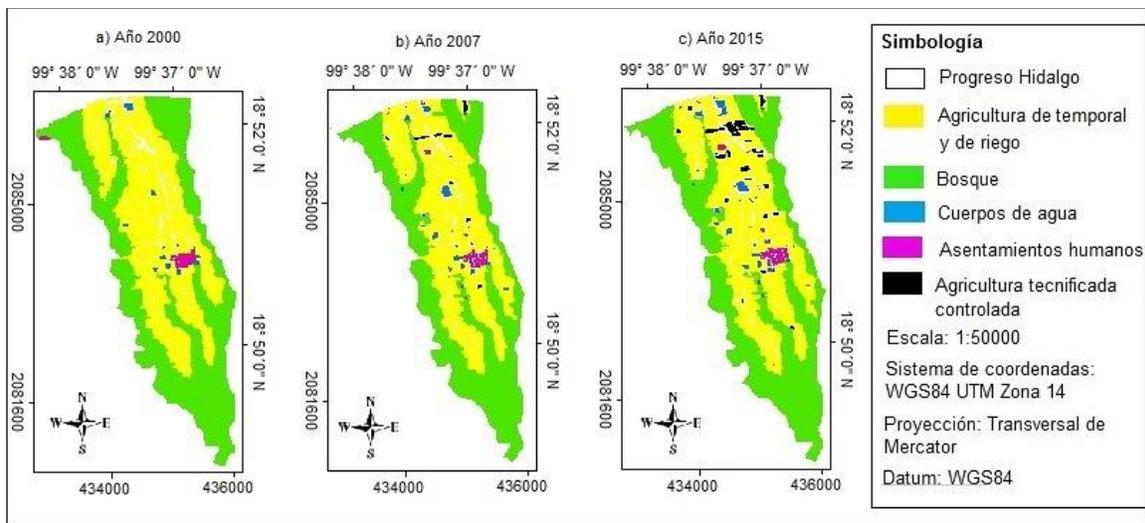


Figura 2. Mapas de uso de suelo y vegetación de Progreso Hidalgo.

Tasas anuales de cambio

Durante el periodo 2000-2007, en Progreso Hidalgo se registraron tasas anuales de cambio que expresan un proceso de reducción en cuanto a la superficie de ciertas coberturas/ usos del suelo, como el caso de la agricultura de temporal o riego y el bosque que registraron tasas anuales de cambio de -0.25% y -0.07%, respectivamente. Por otra parte, existen coberturas y usos del suelo que indican un proceso de expansión en relación a su superficie, como los cuerpos de agua y los asentamientos humanos que registraron tasas anuales de cambio de 5.73%, y 2.11%, respectivamente. En este mismo periodo se observó que para el año 2000 no existían los invernaderos, fue hasta 2007 cuando los habitantes de dicho territorio establecieron este tipo de cobertura/uso del suelo, con una superficie de 5.18 ha.

Para el periodo 2007-2015 se registraron tasas anuales de cambio de -0.55% y -0.006% en la agricultura de temporal o riego y en el bosque, respectivamente. En ambos casos se muestra un proceso de reducción en cuanto a su superficie. En contraste, las coberturas y usos del suelo que manifestaron un proceso de expansión con respecto a su área fueron los invernaderos (33.95%), los cuerpos de agua (2.2%) y los asentamientos humanos (1.7%) [Cuadro 3]. Según Ballesteros (2013), la agricultura comercial tecnificada (invernaderos) en Progreso Hidalgo registró un aumento de 6.1 ha en un periodo de 5 años, es decir, en el año 2005 se establecieron 7.86 ha y para 2010 esta superficie se incrementó a 13.96 ha.

Cuadro 3. Superficie y tasas anuales de cambio por categoría y periodo

Cobertura\Año	2000	2007	Tasa (%) 2000-2007	2015	Tasa (%) 2007-2015
Agricultura de temporal o riego	389.0579	382.0273	-0.2582	365.0361	-0.5560
Agricultura tecnificada controlada	0.0000	5.1874	0.0000	19.2772	33.9519
Bosque	420.3595	418.0344	-0.0790	417.8033	-0.0069
Cuerpos de agua	7.1775	10.0606	5.7384	11.8312	2.2000
Asentamientos humanos	8.6856	9.9708	2.1138	11.3327	1.7074

Modelo de cambios de cobertura y uso del suelo

En la etapa de calibración comprendida entre los años 2000-2007 se observó como principal transición en Progreso Hidalgo el cambio de la agricultura de temporal y riego a la agricultura tecnificada controlada (conversión agrícola). En relación al análisis y observación del comportamiento gráfico de los pesos de evidencia para la transición de agricultura (temporal y riego) a agricultura tecnificada, no fue necesario eliminar ninguna variable, debido a que el patrón de comportamiento de cada una de las variables no fue complejo de modelar. En base al análisis correlacional entre mapas no fue excluida ninguna variable, puesto que los valores registrados fueron bajos en relación al índice de Joint Information Uncertainty con límite de tolerancia de 0.35 (Almeida *et al.*, 2003).

De acuerdo con Mas & Flamenco (2011) en la fase de simulación se visualizaron las áreas de cambio de la transición que implica el proceso de conversión agrícola, en específico de

agricultura de temporal y riego a agricultura tecnificada controlada, para definir la proporción de cambio por expansión y por creación de nuevos parches. Siendo 95% de los cambios resultado de la transformación por parches, es decir, las áreas que pertenecían a la agricultura de temporal y de riego sufrieron el cambio a la agricultura a base de invernaderos.

En el proceso de validación se observó que al utilizar una ventana de 1 x 1 píxel, la concurrencia entre los cambios observados y simulados es media, ya que 39% pertenece al escenario de expansión de invernaderos y 52% al escenario tendencial. En el caso del escenario de expansión de invernaderos, la simulación logra un valor de ajuste de similitud de más de 90% a una distancia de tolerancia de 100 m., mientras que para el escenario tendencial, este porcentaje es notorio a una distancia de 80 m.

La Figura 3 representa una aproximación espacial de los cambios de cobertura y uso de suelo en Progreso Hidalgo, es decir, incluye las transformaciones observadas en el mapa del año 2015 (Figura 3a) y los cambios simulados para cada uno de los escenarios construidos (tendencial y expansión de invernaderos) en el mismo año (Figuras 3b, 3c). Además se integran los mapas correspondientes a los escenarios prospectivos para el año 2025 (tendencial y expansión de invernaderos) (Figuras 3d, 3e).

La Figura 3 (gráfica) expresa los resultados obtenidos de la construcción de los escenarios prospectivos (2025), tendencial y de expansión de invernaderos, que en comparación con el mapa del año 2015 pronostican dos procesos de transformación relevantes en cuanto a su superficie: 1) la agricultura de temporal y de riego presenta un decremento en su extensión, ya que en el año 2015 contenía un área de 365 ha, el escenario tendencial predice que disminuirá a 345 ha y en el escenario de expansión de invernaderos se reducirá a 329 ha y; 2) la agricultura tecnificada controlada representa un aumento en su superficie, puesto que en el año 2015 su extensión era de 19 ha, el escenario tendencial prevé un crecimiento a 35 ha y en el escenario de expansión de invernaderos se incrementará a 47 ha. En comparación con Ballesteros (2013), se difieren los resultados, debido a que en un periodo de 5 años establece, que el bosque presentó una pérdida de 97 ha, la agricultura tradicional aumentó 90 ha y la agricultura tecnificada creció 6 ha.

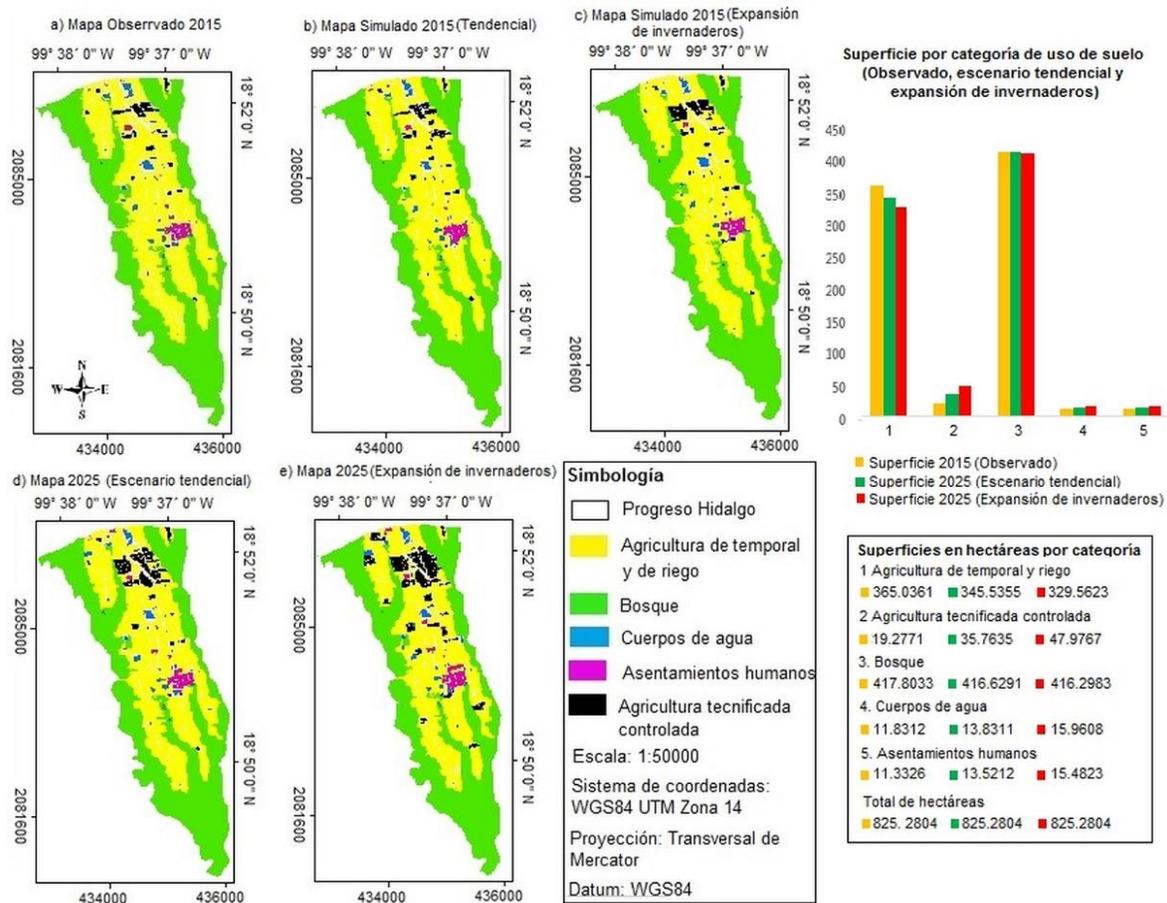


Figura 3. Mapas de uso de suelo y vegetación de Progreso Hidalgo. Observado simulados y prospectivos.

CONCLUSIONES

En Progreso Hidalgo las superficies y tasas anuales de cambio mostraron que las cubiertas de bosque, cuerpos de agua y asentamientos humanos no presentaron cambios significativos en cuanto a su extensión, por el contrario, las transformaciones más significativas, se relacionan con el proceso de conversión entre sistemas agrícolas, puesto que, la agricultura de temporal y de riego fue la cobertura que presentó mayores pérdidas de superficie, mientras que la agricultura tecnificada controlada fue la categoría que obtuvo mayores ganancias en cuanto extensión territorial. Además, los escenarios tendencial y de expansión de invernaderos demuestran el mismo patrón comportamiento orientado al

cambio en la forma de producción agrícola. . La conversión agrícola ocasionó variaciones en la temperatura

El escenario de temperatura, muestra que la tendencia de las temperaturas que caracterizan a Progreso Hidalgo estará condicionada, principalmente, por las actividades económicas que practican los habitantes de este territorio, sobre todo mediante la implementación e intensificación bajo condiciones controladas y tecnificadas (conversión agrícola), para satisfacer las demandas de los mercados nacionales e internacionales.

BIBLIOGRAFÍA

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

Ballesteros, A. 2013. Cambio de Uso de Suelo en una comunidad de transición ecológica. Progreso Hidalgo, Estado de México: impactos y consecuencias (2005-2010). Tesis profesional. UAEMéx, Facultad de Geografía. México. México.

Bahadur, R., & Murayama, Y. (2011). *Urban growth modeling of Kathmandu metropolitan region, Nepal*. Computers, Environmental and Urban Systems, 35: 25-34. doi:10.1016/j.compenvurbsys.2010.07.005

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

Card, H. (1982). *Using known map category marginal frequencies to improve estimates of thematic map accuracy*. Photogrammetric, Engineering and Remote Sensing, 48 (3): 431-439.

Congalton, R., Martin, M. E., Newman S. D., & Aber J. D. (1998). *Determining forest species composition using high spectral resolution remote sensing data*. ELSEVIER, 65:249–254

Eastman, R. (2009). *IDRISI Taiga: Guide to GIS and image processing. Manual version 16.02*. Worcester, MA, USA: Clark University.

Environmental Systems Research Institute (ESRI). (2012). *ArcMap 10.1. ArcGIS Resource Center. Desktop 10*. Redlands, CA, USA: Author. Obtenido de <http://help.arcgis.com/es/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/006600000001000000>

Godoy, M. M. G., & Soares-Filho, B. S. (2008). *Modelling intraurban dynamics in the Savassi neighbourhood, Belo Horizonte city, Brazil*. In M. Paegelow, & M. T. Camacho. Pp. 319–338. Belo Horizonte, Brazil.

Hagen, A. (2003). *Fuzzy set approach to assessing similarity of categorical maps*. *International Journal of Geographical Information Science*, 17 (3): 235–249. doi:10.1080/13658810210157822

Halffter, G. (1964). La entomofauna americana, ideas acerca de su origen y distribución. *Folia Entomológica Mexicana*, 1, 1–108. Obtenido de <http://www.sea-entomologia.org>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2015). Marco Geoestadístico Nacional. Obtenida el 29 de septiembre de 2015 de <http://www.inegi.org.mx>.

Maeda, E., Almeida, C. M., Carvalho, A., Formaggio, A., Shimabukuro, Y., & Pellikka, P. (2011). Dynamic modeling of forest conversion: Simulation of past and future scenarios of rural activities expansion in the fringes of the Xingu National Park, Brazilian Amazon. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13: 435–446. doi:10.1016/j.jag.2010.09.008

Mas, J. F., Díaz, J. R., & Pérez, A. (2003). Evaluación de la confiabilidad temática de mapas o de imágenes clasificadas: Una revisión. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 51, 53–72. Obtenido de <http://www.redalyc.org/pdf/569/56905105.pdf>

Mas, J. F., & Couturier S. (2011). *Evaluación de bases de datos cartográficas*. En F. Bautista (Ed.), *Técnicas de muestreo para manejadores de recursos naturales*. Pp. 675–703. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental-Instituto de Geografía, Michoacán, México

Mas, J. F., & Flamenco, A. (2011). *Modelación de los cambios de coberturas/uso del suelo en una región tropical de México*. *GeoTrópico*, 5 (1), 1–24. Obtenido de http://www.geotropico.org/NS_5_1_Mas-Flamenco.pdf

Organización de la Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (1996). *Forest resources assessment 1990. Survey of tropical forest cover and study of change processes*. Obtenido de <http://www.fao.org/docrep/007/w0015e/w0015e00.htm>

Paegelow, M., & Camacho, M. T. (2008). *Advances in geomatic simulations*. In M. Paegelow, & M. T. Camacho (Eds.), *Modelling environmental dynamics*. Pp. 3–54. Germany: Springer-Verlag.

Ramírez, J., & Juan, J. (2008). *Utilización del chapulixtle (Dodonae viscosa) en los procesos agrícolas de la comunidad de Progreso Hidalgo, Estado de México*. Revista de Geografía Agrícola, 40:19-25.

Soares-Filho, B.S.; Pennachin, C.L; Cerqueira, G. (2002). *DINAMICA – a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier*. Ecological Modelling, 154 (3), 217 – 235.

Soares-Filho, B. S., Rodrigues, H. O., & Costa, W. L. S. (2009). *Modelamiento de dinámica ambiental con Dinamica EGO*. Obtenido de http://www.csr.ufmg.br/dinamica/tutorial/Dinamica_EGO_guia_pratica.pdf

Vallejo, L., Arriaga, J., Adame, S. & Cadena, E. (2013). *Reconversión productiva agrícola y re-significación del ambiente. El caso de Jalmolonga, en Malinalco, Estado de México*. Revista Antroformas, 6-31.

Veldkamp, A., & Lambin, E. (2001). *Predicting land-use change*. Agriculture, Ecosystems and Environment, 85, 1–6. doi:10.1016/S0167-8809(01)00199-2

Xiang, W. N., & Clarke, K. C. (2003). *The use of scenarios in land-use planning*. Environment and Planning B: Planning and Design, 30 (6), 885–909. Obtenido de <http://www.geog.ucsb.edu/~kclarke/Papers/XiangClarke.pdf>