



Elaborada por: Francisco Javier Sahagún Sánchez.

Impactos por cambio de uso de suelo en las áreas naturales protegidas de la región central de la Sierra Madre Oriental, México

Impact of land use cover change on protected natural areas in central region of Sierra Madre Oriental, Mexico

Francisco Javier Sahagún-Sánchez^{1*}, Humberto Reyes-Hernández²

RESUMEN

Los cambios en el uso de suelo y la cubierta vegetal, derivados de la expansión y extensión de actividades antrópicas, generan impactos negativos en la biodiversidad y la provisión de servicios ecosistémicos, y contribuyen significativamente en los procesos de cambio climático a nivel regional. Las Áreas Naturales Protegidas (ANP) representan un instrumento de política pública para hacer frente a las tendencias de cambio y transformación de los ecosistemas, además de permitir la conservación de los recursos. El objetivo de este estudio fue determinar el impacto potencial del cambio en el uso de suelo y la cobertura vegetal de las ANP de la región central de la Sierra Madre Oriental (SMO), en México, a través del análisis espacial y la simulación de escenarios de cambio potencial. Se usaron imágenes satelitales para elaborar mapas de cambio en coberturas vegetales, entre los años 1989, 2000 y 2005, y con base en un conjunto de variables biofísicas y socioeconómicas, se simuló un escenario de cambio al 2025. Se determinó que la tasa de cambio de las cubiertas vegetales de la SMO en el periodo estudiado fue de 0.54 % en selvas, 0.22 % en bosques y 0.23 % en matorrales; y en las ANP fue de 0.34 % y 0.60 % para selvas y bosques, respectivamente. En este lapso se perdieron 1 578.26 ha de selvas, bosques y matorrales, al interior de las ANP. De mantenerse las tendencias actuales de cambio en el uso de la tierra, otras 4 542.17 ha estarán en riesgo de perderse en un futuro cercano. Los resultados indican que las ANP estudiadas están sometidas a presiones de cambio en el uso de la tierra, que amenazan la conservación del patrimonio natural que resguardan, por lo que deberían rediseñarse las estrategias de manejo y monitoreo a corto y mediano plazo.

PALABRAS CLAVE: cambio de uso de suelo, conservación, Área Natural Protegida, Sierra Madre Oriental.

ABSTRACT

Land use cover change, resulting from the expansion and extension of human activities, generates negative impact on biodiversity and the provision of ecosystem services, as well as contributing significantly to climate change processes at a regional level. Natural Protected Areas (NPA) represent a public policy instrument to address the trends of change and ecosystem transformation, while allowing the conservation of resources. The objective of this study was to determine the potential impact of the processes involved in land use cover change on the NPA as part of the central region at the Sierra Madre Oriental (SMO) in Mexico by using the special analysis and the scenery simulation of potential change. Satellite imagery was used to determine the changes in natural vegetation cover between 1989, 2000 and 2005 and, using a set of biophysical and socioeconomic variables, a change scenario was simulated for 2025. This study found that the rate of change of vegetation cover at the SMO over the research period was 0.54 % in tropical forests, 0.22 % in forests and 0.23 % in scrublands, while those in NPA were 0.34 % and 0.60 % in tropical forests and forests respectively; 1 578.26 ha of tropical semi-deciduous temperate forest and scrublands were lost from the NPA. If the current land use trends change continues, another 4 542.17 ha are likely to be modified in the future. These results indicate that NPA under study are subject to the pressures of land use change that threaten the natural heritage under protection and that, therefore, management strategies and monitoring need to be redesigned in the short and medium term.

KEYWORDS: land use cover change, conservation, Natural Protected Area, Sierra Madre Oriental.

*Correspondencia: javosahagun@gmail.com / Fecha de recepción: 20 de junio de 2016 / Fecha de aceptación: 17 de febrero de 2017

¹Universidad de Guadalajara, Departamento de Políticas Públicas, CUCSEA, Periférico Norte núm. 799, Núcleo Universitario Los Belenes, Zapopan, Jalisco, México, C.P. 45100. ²Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ciencias Sociales y Humanidades.

INTRODUCCIÓN

El estudio de los procesos de modificación de los ecosistemas es un tema de interés a nivel global, y ha sido establecido como una prioridad en la Evaluación Ecosistémica del Milenio (Leemans y de-Groot, 2005; ONU, 2010; Sotelo-Caro y col., 2015). Específicamente, se busca profundizar en la comprensión de las causas directas y subyacentes que promueven los cambios en el uso de suelo, haciendo énfasis en la evaluación de las tendencias actuales y futuras de la transformación en las coberturas vegetales naturales (Geist y Lambin, 2002; Turner II y col., 2007; Galicia y col., 2014). Diversos autores han desarrollado investigaciones detalladas sobre los cambios en los ecosistemas, a fin de garantizar su integridad y la provisión de los servicios ecosistémicos (Metzger y col., 2006; Illoldi-Rangel y col., 2008; Sarukhán y col., 2015).

A nivel mundial, las estrategias más efectivas para mitigar y prevenir los efectos derivados de amenazas por cambio en el uso de suelo, así como la deforestación, se fundamentan en el establecimiento de Áreas Naturales Protegidas (ANP) (Figueroa y Sánchez-Cordero, 2008; Ochoa-Ochoa y col., 2009). En México, las ANP constituyen uno de los instrumentos de política pública ambiental mejor definidos y con mayor certeza jurídica (CONANP, 2015). Las ANP son representativas de los distintos ecosistemas presentes en el país y cubren aproximadamente 12 % de la superficie del territorio nacional (Figueroa y Sánchez-Cordero, 2008). No obstante, dista aún del 17 % que se propone como superficie meta para lograr los objetivos de la conservación de la biodiversidad a nivel global (Illoldi-Rangel y col., 2008; CBD, 2012).

Pese a su carácter legal, las ANP no están exentas de las presiones de cambio en el uso de suelo, y la extensión de la frontera agropecuaria puede afectar la integridad de las coberturas naturales representadas en las ANP de la región (Chapa y Monzalvo, 2012). En México, se registra un ritmo acelerado de transformación por cambios en el uso de suelo y

deforestación; esto debido, entre otros factores, al incremento en la densidad poblacional y la demanda de espacios para desarrollos urbanísticos, la extensión de las fronteras agrícolas y ganaderas, así como, la apertura de nuevas vías de comunicación e infraestructura hidráulica (Mas y col., 2004; Miranda-Aragón y col., 2013a; Camacho-Sanabria y col., 2015; Delphin y col., 2016).

La ubicación geográfica privilegiada de México ha permitido la existencia de regiones con alta concentración de biodiversidad (CONABIO, 2015). Entre éstas, destaca la región biogeográfica de la Sierra Madre Oriental (SMO), donde existen remanentes de bosques templados y selvas con extensiones considerables y un alto grado de conectividad (CONANP, 2013). Dichas características le permiten funcionar como un corredor biológico, que facilita el intercambio entre poblaciones de vertebrados, y ser una fuente de servicios ecosistémicos para sus habitantes (Sahagún-Sánchez y col., 2011; Reyes-Hernández y col., 2013).

A pesar de la importancia biológica descrita, los procesos de modificación y la pérdida de hábitat, así como la sobreexplotación y el comercio ilegal de recursos naturales en esta región, han generado condiciones adversas para su mantenimiento y conservación (CONANP, 2013). En la última década, la SMO ha perdido más de 36 000 ha de bosques y selvas (Sahagún-Sánchez y col., 2011), lo cual ha propiciado un incremento en la fragmentación de las áreas con cobertura naturales y ha favorecido la conectividad de las áreas transformadas por actividades antrópicas.

Dada la cantidad de variables que influyen en los procesos de transformación de los ecosistemas y características intrínsecas del territorio (relieve, topografía, tipos de suelo, entre otros) (Sahagún-Sánchez y col., 2011), los modelos espaciales han resultado ser herramientas útiles para manejar y analizar la información sobre la dinámica de cambio en el territorio (Godoy y Soares-Filho, 2008; Galicia y col., 2014). En este sentido, es necesario conside-

rar los subsistemas humano y biofísico, y así, proveer resultados geográficamente explícitos (Turner II y col., 2007).

El creciente acceso a bases de datos espaciales y el desarrollo de los sistemas de información geográfica, han promovido el desarrollo de programas que permiten la simulación de procesos, para explicar los patrones observados en distintas escalas, tanto temporales como espaciales (Zavala y col., 2008). A través de estos modelos, denominados espacialmente explícitos, es posible generar proyecciones a futuro de los fenómenos relacionados con los cambios en el uso de suelo, los procesos de deforestación y la resiliencia de los ecosistemas (Soares-Filho y col., 2002; Turner II y col., 2007; Camacho-Sanabria y col., 2015; Delphin y col., 2016).

El objetivo de este estudio fue evaluar el impacto de los procesos de cambio en el uso de suelo, en el ámbito de las ANP de la región central de la Sierra Madre Oriental, México, a través del análisis espacial y la simulación de escenarios de cambio potencial, para identificar las zonas más vulnerables.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La Sierra Madre Oriental (SMO) está formada por un conjunto de sierras menores, de estratos sedimentarios plegados, que provienen de antiguas rocas sedimentarias marinas del Cretácico y del Jurásico Superior, entre las que predominan las calizas, las areniscas y las lutitas; muestra un gradiente altitudinal que va de los 100 m en la vertiente ascendente del golfo de México, hasta los 3 000 m en sus cumbres más elevadas (INEGI, 2003). La región bajo estudio se localiza en el centro-sureste del estado de San Luis Potosí, México, entre las coordenadas 22°45'20" N y 21°09'18" N y 99°55'01" W y 98°40'38" W, con una superficie de 770 234.68 ha (Figura 1).

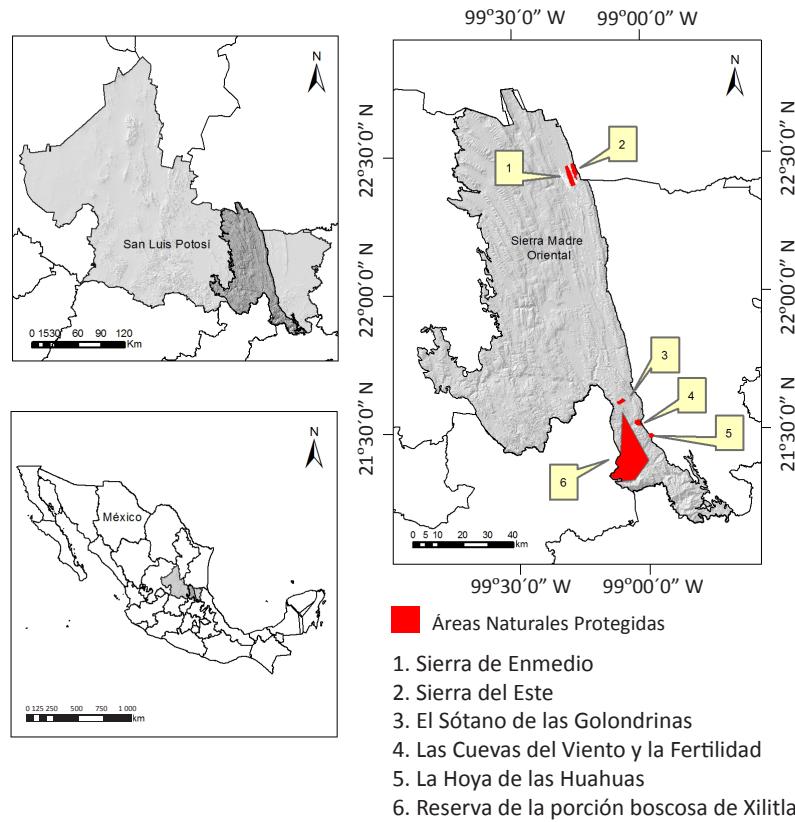
Dada su ubicación geográfica, su orografía y la presencia de casi todos los tipos climáticos descritos para el país, presenta un mosaico de ambientes, con una vasta biodiversidad (Luna

y col., 2004). La combinación de las características descritas permite la presencia de distintos ecosistemas, distribuidos en un gradiente que va desde regiones secas con matorrales xerófilos y escasas precipitaciones, pasando por zonas cálidas-húmedas con alta precipitación, cubiertas por selvas caducifolias y subperennifolias, hasta bosque mesófilo de montaña y zonas templadas con bosques de coníferas y encinos (Figura 2) (Leija y col., 2011). Esta diversidad ecosistémica contiene, a su vez, una alta biodiversidad de especies, que incluye más de 2 500 plantas vasculares, alrededor de 210 especies de anfibios y reptiles, cerca de 540 especies de aves y más de 200 especies de mamíferos (Luna y col., 2004). Entre las especies emblemáticas de la región, se encuentran varios felinos, como el jaguar (*Panthera onca*) y el ocelote (*Leopardus pardalis*), aves como la guacamaya verde (*Ara militaris*) o el hocofaisán (*Crax rubra*), y algunas especies vegetales, como el soyate (*Beaucarnea inermis*) y el chamal (*Dioon edule*), entre otras. Todas las especies mencionadas se encuentran en alguna categoría de riesgo, por lo que es importante promover acciones para su conservación (Luna y col., 2004; DOF, 2010; Sahagún-Sánchez y col., 2013).

En esta zona, se registran cerca de 500 000 habitantes, distribuidos en 14 municipios, de los cuales, casi el 30 % pertenecen a alguno de los grupos étnicos presentes en la región (tenek, nahuas y pames). Las principales actividades económicas en la zona están relacionadas con la agricultura y la ganadería, donde predominan los cultivos de caña de azúcar y cítricos para comercialización, así como de maíz y frijol para subsistencia (SEDARH, 2015). Por sus características escénicas y su diversidad cultural, se presenta un creciente desarrollo de actividades ecoturísticas. Sin embargo, la región muestra altos índices de marginación de acuerdo con los indicadores nacionales (CONAPO, 2010).

Áreas dedicadas a la conservación

En la zona de estudio existen seis ANP (Figura 1) que suman una superficie de 22 676.10 ha



Fuente: CONANP, 2010; INEGI, 2010; Reyes-Hernández y col. (2010); SRTM, 2011.

■ Figura 1. Ubicación del área de estudio.

Figure 1. Study area.

(Tabla 1) (CONANP, 2015). Las áreas cuentan con decretos que les otorgan su estatus desde el punto de vista normativo, como: áreas de protección estatal, reserva forestal, monumento nacional y sitio sagrado natural. Todas, salvo los sitios sagrados naturales, están definidas en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) (DOF, 2014), y es en este instrumento donde se describen puntualmente el tipo de actividades que se pueden desarrollar al interior de las mismas, así como las responsabilidades y atribuciones de los administradores y usufructuarios, sin embargo, sólo una de ellas (el Sótano de las Golondrinas), cuenta con un plan de manejo elaborado.

Las seis ANP presentan diferentes características ambientales, que incluyen distintos tipos de vegetación (Figura 2), entre los que destaca-

can el bosque mesófilo de montaña (Reyes-Hernández y col., 2013), por ser uno de los ecosistemas más amenazados a nivel global; el cual se caracteriza por la presencia de especies boholechos arborescentes y un número importante de epifitas en las inmediaciones de Xilitla (Leija-Loredo y col., 2011; CONABIO, 2015).

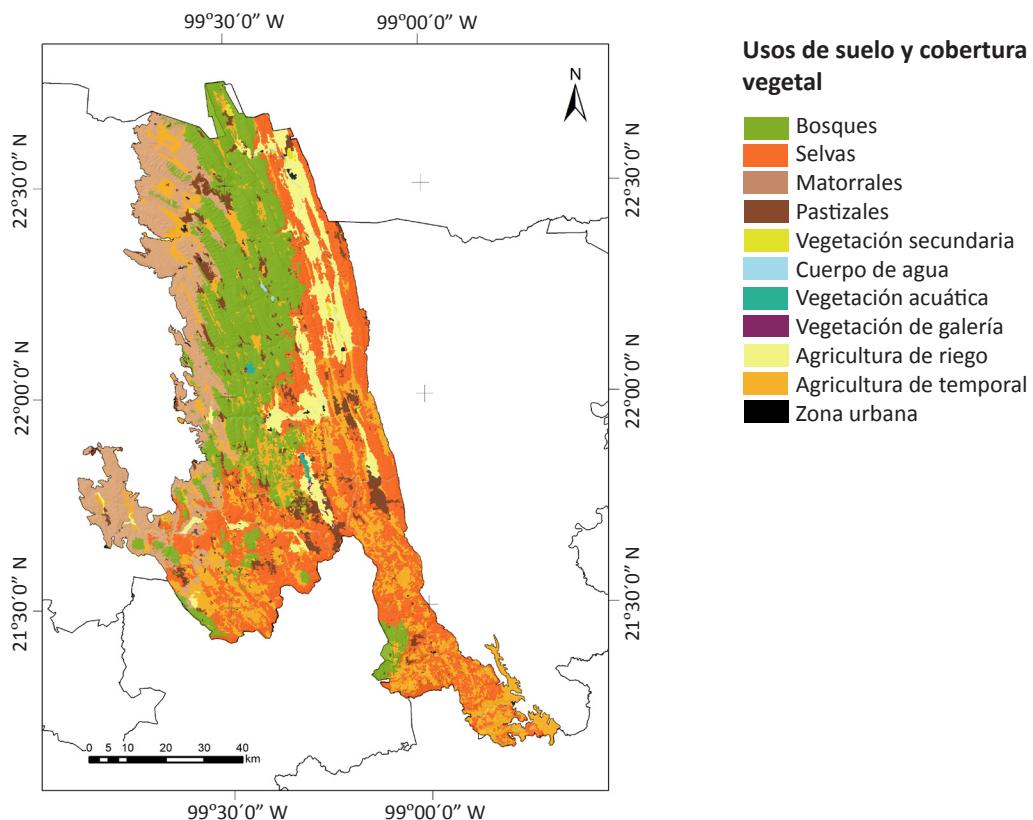
Generación de escenarios y áreas de cambio en el uso de suelo

Para obtener los escenarios de cambio futuro en el área de estudio de las ANP, se interpretaron y clasificaron las imágenes de satélite Landsat 5 TM (Thematic mapper), de enero de 1989 y abril del 2000, y la Landsat 7 ETM+ (Enhanced Thematic mapper), de febrero de 2005, con una resolución de 30 m. Se eligieron imágenes correspondientes a la SMO en las diferentes fechas, para la época de secas, cuando

■ Tabla 1. Descripción de Áreas Naturales Protegidas (ANP) en la región central de la Sierra Madre Oriental.

Table 1. Protected Natural Areas (PNA) in the central region of Sierra Madre Oriental.

| Área Natural Protegida | Categoría | Superficie (ha) |
|--------------------------------|----------------------------|-----------------|
| Sierra de Enmedio | Área de protección estatal | 1 136.56 |
| Sierra del Este | Área de protección estatal | 661.70 |
| Sótano de las Golondrinas | Monumento nacional | 287.06 |
| Cuevas del Viento y Fertilidad | Sitio sagrado natural | 408.00 |
| La Hoya de las Huahuas | Monumento nacional | 8.00 |
| Porción boscosa de Xilitla | Reserva forestal nacional | 20 174.78 |
| | Superficie total (ha) | 22 676.10 |



Fuente: INEGI, 2010; Reyes-Hernández y col. (2010).

■ Figura 2. Uso de suelo y vegetación de la región de la Sierra Madre Oriental.

Figure 2. Land use and vegetation cover of Sierra Madre Oriental.

es más factible obtener imágenes libres de nubes (Mas y Flamenco, 2011). La clasificación se basó en la delimitación de campos de entrena-

miento, considerando al menos 10 veces el número de bandas utilizadas para el cálculo de las estadísticas (Jensen, 1996), luego de lo cual,

se realizó la clasificación supervisada con el algoritmo de máxima verosimilitud (Lillesand y col., 2015). Se generaron tres mapas (1989, 2000 y 2005) como línea base de la cobertura vegetal. Con la información derivada, se identificó y cuantificó la magnitud de los cambios en las coberturas en el periodo de 1989 a 2005. El sistema de coordenadas utilizado fue WGS 1984 en proyección UTM (Zona 14 N), con elipsoide Clark, 1866 (Sahagún-Sánchez y col., 2011).

Para la proyección de escenarios de cambio en el uso de suelo y coberturas en el futuro, se utilizó el programa DINAMICA EGO (Soares-Filho y col., 2002), que se basa en la asignación de pesos de evidencia, para un conjunto de variables socioeconómicas de influencia consideradas relevantes para el caso, así como la modelación de escenarios tendenciales con la técnica de autómatas celulares. Las variables consideradas en este caso incluyeron las capas de información espacial sobre la cobertura vegetal, generadas para las tres fechas mencionadas, las de tipos de suelo e hidrología superficial, que son categóricas; la de altitud en msnm y la de pendiente en porcentaje.

La información de tipo socioeconómico se incorporó al modelo a través de capas desarrolladas, con la representación espacial de la influencia de la distancia a carreteras principales y secundarias. Además, distancia a poblaciones, mediante la aplicación de una zona de influencia (buffer), equivalente a la distancia euclíadiana mínima (Pijanowski y col., 2002). La densidad poblacional, tenencia de la tierra y el índice de marginación de la población (Sahagún-Sánchez y col., 2011), fueron obtenidas de fuentes oficiales (CONAPO, 2010; INEGI, 2010; RAN, 2010), y tratadas mediante un procedimiento de interpolación (Ordinary Kriging) (Peñesma y Wesseling, 1998). A partir de esta información se proyectaron los escenarios modelados del paisaje para el año 2025, y se ubicaron geográficamente los sitios más vulnerables, con base en las tendencias observadas en las distintas fechas. El método permitió

evaluar los patrones de cambio en las coberturas y el efecto de cada una de las variables consideradas, a partir del cálculo de sus pesos de evidencia (Bonham, 1994). Estos pesos se calcularon por un método bayesiano, en el que el efecto de una variable espacial, en una transición dada, se obtuvo de manera independiente a la solución combinada (Soares-Filho y col., 2009). Las variables determinaron la ubicación de los cambios y luego se combinaron, sumando sus pesos de evidencia para obtener un mapa de probabilidad transicional que desplegó las áreas más propensas de cambio. Para mayor información sobre la aplicación del método revisar Sahagún-Sánchez y col. (2011).

Para optimizar el análisis, se separó la información de cambio entre las distintas fechas y se generaron capas para cada uno de los tipos de cobertura, de forma que fuera posible estimar independientemente la superficie susceptible de ser modificada, así como su localización espacial (Sahagún-Sánchez y col., 2011). Las coberturas vegetales fueron clasificadas con base en tres clases generales, para disminuir el error derivado de la afinidad entre coberturas similares (Mas y col., 2004). Las clases incluyeron los bosques (de coníferas y encinos); las selvas (bajas caducifolias y medianas subperennifolias); y los matorrales (submontanos). El cálculo de las superficies de cambio entre las coberturas en los escenarios futuros proyectados se realizó con el módulo Land Change Modeler for Ecological Sustainability, del programa Idrisi Selva 17.0. Esta es una aplicación vertical desarrollada por Clark-Labs (2012), para la evaluación de los problemas originados por los cambios en el uso de suelo y otros temas vinculados con la conservación de la biodiversidad (Eastman, 2012). Con esta herramienta se automatizó el proceso de álgebra de mapas y la obtención de una valoración cuantitativa, además de una representación espacialmente explícita de la dinámica de los cambios, en términos de las pérdidas o ganancias en el tiempo y entre las coberturas vegetales y usos de suelo. Esto permitió generar los mapas de cambios para los periodos 1989 a 2005 y 2005 a 2025, así como

las tablas de referencias cruzadas con los valores de cambio correspondientes.

Impacto por cambio de uso de suelo sobre las ANP

Para evaluar el impacto potencial de los cambios a futuro en el uso de suelo sobre las ANP, se combinaron los escenarios de cambio al 2025 y las capas de información con los polígonos delimitados para las ANP. El procedimiento propuesto en este estudio, para lograr una estimación comparativa, fue el siguiente:

1. Evaluación del cambio en el uso de suelo actual y futuro.
2. Identificación de zonas con alta vulnerabilidad por efectos de cambio potencial en las coberturas.
3. Valoración cuantitativa del impacto por cambio real y potencial en las ANP.

La cuantificación de las áreas de cambio en las coberturas vegetales permitió medir la reducción total y el porcentaje de las superficies afectadas en las ANP, además de que, por ser un modelo espacialmente explícito, fue posible ubicar en el espacio geográfico las áreas donde se modificó la cobertura vegetal (Menon y col., 2001). Finalmente, se estimó la superficie que potencialmente podría modificarse en el futuro dentro de cada una de las ANP consideradas. Todas las estimaciones fueron realizadas mediante álgebra de mapas y operaciones de sobreposición espacial y tabulaciones cruzadas en los sistemas de información geográfica Ilwis 3.3, (Ilwis, 2012) Idrisi Selva 17.0 (Eastman, 2012) y ArcMap 9.3 (Esri, 2008).

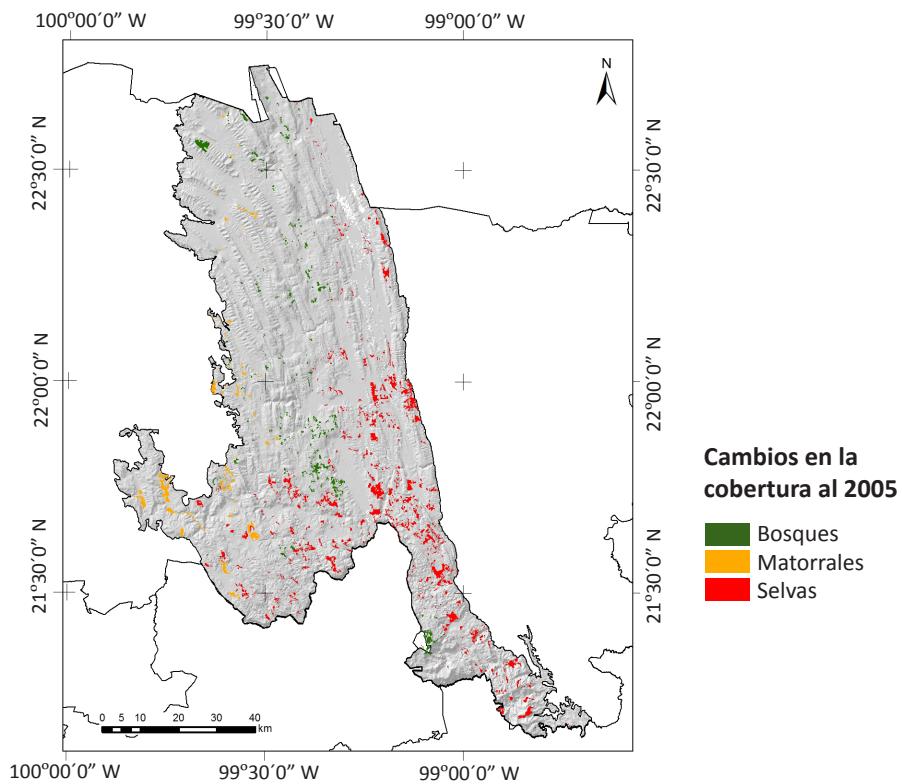
RESULTADOS

Los procesos de cambio en el uso de suelo en la región estudiada de la SMO han significado la pérdida de 35 603.44 ha (4.62 %) de superficie de selvas, bosques y matorrales, entre 1989 y 2005 (Figura 3). De este total, 67.45 % (24 013.06 ha) correspondió a selvas, 21.55 % (7 672.04 ha) a bosques y 11.01 % (3 918.34 ha) a matorrales. Con respecto a la superficie ori-

ginal, las selvas (244 035.61 ha.) disminuyeron un 9.84%, los bosques (193 762.44 ha) un 3.96 % y los matorrales (119 517.93 ha) un 3.28 %. Las tasas de cambio en la superficie para el periodo de 1989 al 2005 corresponden a 0.64 %, 0.25 % y 0.20 %, respectivamente. Las selvas fueron transformadas principalmente en pastizales, los bosques en tierras dedicadas a la agricultura y los matorrales en usos diversos, incluidos los desarrollos urbanos. Las áreas cubiertas por selvas bajas caducifolias son las más propensas al cambio, derivado de la fuerte presión que existe para el establecimiento de actividades agropecuarias (Reyes-Hernández y col., 2013).

De la superficie total de cobertura natural transformada entre 1989 y 2005, 1 578.26 ha se ubicaron dentro de los límites de las ANP, lo que implica que el 6.96 % de la superficie protegida sufrió algún tipo de modificación. Por consiguiente, el 93.04 % (21 097.84 ha) de la superficie protegida por los decretos permaneció sin cambio. Las tasas de cambio en la superficie de las ANP de la SMO correspondieron a 0.34 % de selvas y 0.60 % de bosques. No se registró cobertura de matorrales en ninguna de las ANP analizadas, ya que ésta se distribuye en su mayoría al oeste de la SMO (Figura 2), por lo que no fue posible calcular una tasa. Por otro lado, en el mismo periodo, fueron transformadas 34 025.18 ha de selvas, bosques y matorrales que se ubican fuera de jurisdicción de las ANP. Por lo que la superficie total del área de estudio no sufrió cambios en este periodo (734 631.24 ha).

Se presenta una tendencia de cambio en las coberturas naturales hacia usos de suelo relacionados con la agricultura (de temporal y riego), los pastizales inducidos, y en algunos casos, se manifiestan procesos de sucesión ecológica en áreas abandonadas, donde predomina la vegetación secundaria. Se generaron un total de 360 funciones de pesos de evidencia con influencia sobre los procesos de cambio; se determinó que las variables que tienen mayor peso de evidencia corresponden, en orden de prelación, a la densidad poblacional, la



Fuente: INEGI, 2010; Reyes-Hernández y col. (2010); SRTM, 2011.

Figura 3. Ubicación espacial de cambios en la cobertura vegetal en el periodo de 1989 a 2005.
Figure 3. Location of land use and vegetation cover changes in the period from 1989 to 2005.

distancia a carreteras principales y el grado de marginación de la población, aunque de manera secundaria, influyen la distancia a poblaciones, la pendiente y la tenencia de la tierra.

Consecuentemente, la ubicación y extensión de los cambios a 2005 y su tendencia al futuro, mostraron una correspondencia de distribución espacial clara con las zonas en el centro y sur, donde hay una concentración de poblaciones mayor y donde también se presentan los índices más altos de marginación.

La superficie que potencialmente estaría en riesgo de ser transformada para el 2025, asciende a 49 123.08 ha (6.38 %), de las cuales, el 61.97 % corresponderían a áreas cubiertas de selvas (30 439.36 ha), 21.06 % a bosques (10 343.16 ha) y 16.98 % a matorrales (8 340.56 ha) (Figura 4). De forma similar a las tendencias para el periodo de 1989 a

2005, en el 2025 las superficies mostraron propensión a ser remplazadas por actividades agropecuarias.

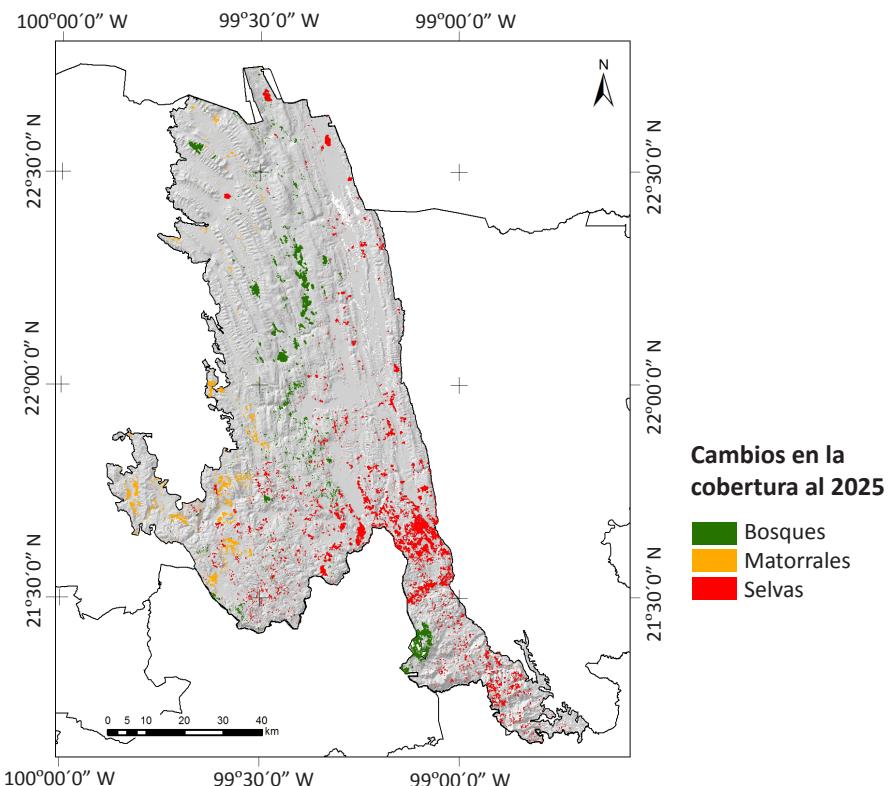
En el escenario de tendencias, al año 2025, se determinó que el 20.03 % (4 542.17 ha) de la superficie con cubiertas naturales, dentro de las ANP, que en total suman una superficie de 22 676.10 ha, son proclives al cambio. Así mismo, se proyectó la pérdida potencial de 44 580.91 ha de coberturas vegetales que no se encuentran consideradas en el sistema de reservas a nivel estatal o federal y que son de relevancia para la conservación de los ecosistemas en la región. Esta superficie equivale al 5.79 % de la superficie total del área (770 234.68) (Figura 5).

El modelo a futuro (2025), prevé que la expansión de la agricultura de temporal será de 32 771.23 ha (66.71 %) y la remoción de vege-

■ Tabla 2. Superficie (ha) de cobertura natural transformada en uso de suelo agropecuario en el periodo de 1989 a 2005 y su proyección al 2025.

Table 2. Vegetation cover transformed into agricultural land uses in the period from 1989 to 2005 and its projection to 2025.

| Tipo de cobertura inicial | Agricultura de temporal (ha) | | Pastizal (ha) | |
|---------------------------|------------------------------|-------------|---------------|-------------|
| | Periodo | | Periodo | |
| | 1989 a 2005 | 2005 a 2025 | 1989 a 2005 | 2005 a 2025 |
| Selvas | 17 331.65 | 20 581.76 | 4 201.05 | 8 723.71 |
| Bosques | 4 413.38 | 6 482.73 | 1 683.21 | 5 292.20 |
| Matorrales | 4 090.10 | 5 706.75 | 821.11 | 1 617.06 |

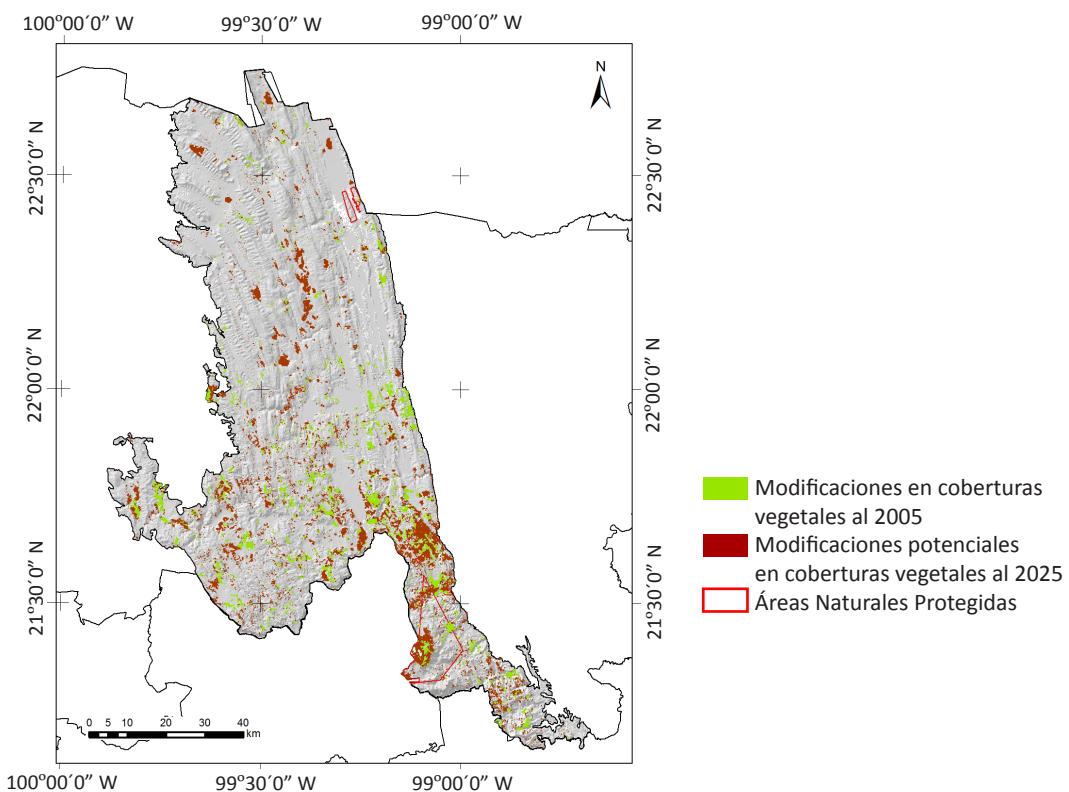


Fuente: INEGI, 2010; Reyes-Hernández y col. (2010); SRTM, 2011.

■ Figura 4. Ubicación espacial de cambios esperados en la cobertura vegetal en el periodo de 2005 a 2025.
Figure 4. Location of future changes in vegetation cover in the period from 2005 to 2025.

tación original para el uso de tierras como pastizales tendrá un incremento de 15 632.98 ha (31.82 %) (Tabla 2). Estas trayectorias de cambio constituyen las dos principales amenazas directas en el proceso de transformación en

la zona a mediano plazo. Las tierras usadas para la agricultura de riego (con un crecimiento proyectado de 646.46 ha (1.32 %) y las zonas urbanas con 72.41 ha (0.15 %), provocarán impactos en los ecosistemas, debido a la demanda



Fuente: CONANP, 2010; INEGI, 2010; Reyes-Hernández y col. (2010); SRTM, 2011.

Figura 5. Ubicación espacial de modificaciones actuales y potenciales en el área de estudio y al interior de los polígonos de Áreas Naturales Protegidas.

Figure 5. Location of current and potential changes in study area and within protected natural areas.

da de apertura de tierras para desarrollos urbanos, así como nuevas vías de acceso y comunicación.

DISCUSIÓN

La modificación en el paisaje de la SMO presenta dinámicas complejas, que dependen del tipo de cobertura, las actividades productivas y la situación socioeconómica y política preponderante, como en otras regiones de México (Mas y col., 2004; 2009; Guerrero y col., 2008; Miranda-Aragón y col., 2013a; 2013b).

De acuerdo con Miranda-Aragón y col. (2013b), en el periodo 1993 a 2007 se presentó la mayor intensidad de cambio en la región de la huasteca potosina, debido principalmente a la presión por actividades agropecuarias, lo cual coincide

con las áreas más propensas al cambio detectadas en este trabajo, que son las áreas cubiertas por selvas bajas caducifolias. Dicho patrón es promovido por las condiciones de humedad, las suaves pendientes que se presentan en el terreno y los apoyos gubernamentales para la reactivación de actividades agropecuarias, que se han generado para esa región del estado (Reyes-Hernández y col., 2006).

La pérdida anual de las selvas presentó una tasa de 0.64 % en la SMO estudiada (1989-2005), lo que la ubica por debajo de la tasa anual de deforestación para esta cobertura en el país (1.0 % a 1.4 %) y que ha provocado una pérdida acumulada superior al 60 % de la superficie (Trejo y Dirzo, 2000; Mas y col., 2004; Meave y col., 2012; Sotelo-Caro y col., 2015).

Leija-Loredo y col. (2011), señalaron que otro de los ecosistemas con alto riesgo de ser transformado en la región es el bosque mesófilo de montaña, cuyos escasos relictos mostraron un proceso de reducción y fragmentación, con una pérdida de más del 40 % de la superficie de cobertura en los últimos años. La tendencia se relaciona con la transformación de coberturas naturales por el cambio hacia usos de suelo agropecuarios y/o urbanos (Mas y col., 2009; Sánchez-Cordero y col., 2009; Miranda-Aragón y col., 2013a; Martínez-Meyer y col., 2014).

Por otro lado, los matorrales han sido sustituidos paulatinamente por áreas de pastoreo, lo que ha acelerado los procesos de pérdida y transformación de su superficie en la región, convirtiéndose en una de las cubiertas vegetales más afectadas a nivel estatal en los últimos años (Miranda-Aragón y col., 2013b). Este fenómeno se repite en todo el altiplano potosino y los matorrales de la SMO hacia el noreste de México, donde se desarrollan actividades extensivas de pastoreo de bovinos y caprinos (Molina-Guerra y col., 2013). Derivado de los procesos de cambio, el incremento de áreas cubiertas por vegetación secundaria arbustiva y leñosa, sugieren estados sucesionales que podrían utilizarse como áreas de amortiguamiento, y así favorecer la conectividad de las coberturas modificadas (Sotelo-Caro y col., 2015).

En la SMO se presentan procesos de cambio y modificación de las coberturas que ponen en riesgo la integridad de los ecosistemas representativos y amenazan a la biodiversidad de la zona (Sahagún-Sánchez y col., 2011; Yáñez-Arenas y col., 2012; Miranda-Aragón y col., 2013b; Reyes-Hernández y col., 2013). A los procesos de cambio de uso de suelo detectados en la región, se suma la evidente intensificación en el uso por sobre pastoreo, lo que ocasiona la simplificación (disminución de la heterogeneidad estructural) paulatina de los bosques y selvas, y conduce a una declinación en la riqueza y la abundancia de las especies (Ramírez-Albores, 2010; Carrara y col., 2015).

Particularmente, al interior de las seis ANP, se identificó que las trayectorias de cambio sugieren la sustitución de coberturas naturales por actividades productivas relacionadas con la agricultura de temporal, los pastizales y en menor grado la agricultura de riego, lo cual es similar a lo reportado en otros trabajos para la región (Sahagún-Sánchez y col., 2011; Molina-Guerra y col., 2013; Miranda-Aragón y col., 2013b).

En el análisis de las variables socioeconómicas, que tienen influencia sobre los cambios y sus trayectorias, se destacaron las relacionadas con la situación de marginación y pobreza de la población en la zona. Las prácticas de desmonte para cultivo de subsistencia y el manejo inadecuado de las áreas abiertas, generan un proceso de deforestación de baja intensidad, que pone en riesgo la resiliencia socio ambiental y amenaza la permanencia de las coberturas naturales y la integridad ecosistémica al interior de las ANP, así como en la región (Pérez-Verdín y col., 2009). Lo anterior, demanda la participación del Estado para que se incorporen a la agenda de política ambiental nuevos programas de desarrollo social y económico, que promuevan un uso y aprovechamiento ambientalmente responsable de los recursos en la región de la SMO, de forma que se eviten afectaciones a la provisión de servicios ecosistémicos (Sarukhán y col., 2015).

Las seis ANP analizadas se ubican en las interacciones de lo que constituye el corredor ecológico de la SMO, a su paso por el estado de San Luis Potosí (CONANP, 2013; CESMO, 2016); estas representan el 2.94 % (22 676.10 ha) del área de estudio (770 234.78 ha); y constituyen apenas el 0.4 % del total de las ANP del estado; por lo que, no son representativas de los ecosistemas presentes en la zona.

En el estado de San Luis Potosí, existen 20 ANP de carácter estatal y federal, que suman en total 495 388 ha, lo que significa que el 8 % de la superficie estatal se encuentra en alguna categoría de protección (CONANP, 2015). De acuerdo con Loa y col. (2009), la superficie protegida

en el estado debería ser de al menos el 15 %, por lo que se requiere seguir generando información sobre los procesos de cambio que incrementan la vulnerabilidad en la región, identificando elementos clave para una adecuada priorización de las ANP, de forma que sea posible alcanzar los objetivos planteados en términos de la conservación de los recursos naturales.

Estudios recientes documentaron la existencia de vacíos y omisiones en el sistema de ANP en el estado (Chapa y Monzalvo, 2012; Sarukhán y col., 2015); por lo tanto, habría que sumar una importante superficie a la red de ANP, para atender las necesidades de conservación de las coberturas de vegetación natural existentes, así como la vasta riqueza biológica y servicios ambientales que proveen (Loa y col., 2009; Sahagún-Sánchez y col., 2013). Por otro lado, no obstante que existe claridad en la legislación, acerca de las atribuciones en los distintos niveles de gobierno y la obligatoriedad del diseño e implementación de planes de manejo para las ANP (SEMARNAT, 2015), se manifiesta una falta de capacidad institucional (Rosas, 2008) para lograr mejores resultados en el manejo y conservación de las ANP (Halffter, 2011).

Los resultados indican que, aunque las ANP desempeñan un papel importante en la conservación de ecosistemas prioritarios de selvas y bosques en la región, se ven amenazadas por factores de cambio directos, como la expansión de las distintas formas de agricultura y de infraestructura; e indirectos (factores demográficos o políticos), como la apertura de nuevos caminos que promueven la explotación forestal, lo que puede comprometer su capacidad de resiliencia y pone en duda la efectividad de las acciones del gobierno al respecto. A pesar de la fortaleza de las ANP como instrumento de política de conservación, los procesos de cambio, al interior de las ANP, en las distintas regiones del país, se siguen presentando. Sánchez-Cordero y Figueroa (2007), mencionaron que aproximadamente el 35 % de una muestra representativa de ANP en el país, con categoría de Reservas de la Biósfera, han sufrido afectaciones por cambios en el uso de suelo. En es-

te trabajo, se determinó un cambio de 6.96 % en la superficie con cobertura dentro de los límites de las ANP, lo que contrasta, por ejemplo, con lo reportado por García y col. (2001), para la Reserva de la Biósfera de Calakmul, donde se estimó una transformación del 3.5 % de la superficie de cobertura natural dentro del área de la reserva. En otro caso estudiado, en la Reserva de la Biósfera Sierra de Manantlán, Farfán y col. (2016), determinaron tasas de deforestación de casi 2 % para selvas bajas y selvas medianas, y 0.33 % para bosques mixtos de pino-encino, mientras que en las ANP de la SMO estudiada, las selvas presentaron una tasa de cambio del 0.34 % y los bosques de 0.60 %. Por lo anterior, se requieren acciones que garanticen la conservación de los ecosistemas que resguardan (Lambin y col., 2003; Sánchez-Cordero y col., 2009; Carrara y col., 2015).

En todos los casos descritos, el uso de herramientas de análisis espacial ha sido fundamental para determinar los patrones de cambio en el uso del suelo. La aplicación de un modelo espacialmente explícito, en este trabajo, permitió cuantificar y ubicar las trayectorias y la dimensión de los cambios a partir de la combinación de información ambiental y socioeconómica, lo que demuestra su utilidad como herramienta de apoyo en la evaluación para la toma de decisiones sobre nuevas estrategias de manejo (Menon y col., 2001; Soares-Filho y col., 2002; Galicia y col., 2014). Como en otros casos de estudio (Godoy y Soares-Filho, 2008; Delphin y col., 2016), la generación de escenarios a futuro proporciona elementos para el desarrollo de planes de conservación, que garanticen el mantenimiento de los ecosistemas de interés; lo que facilita el diseño de estrategias de conservación pertinentes en el contexto regional y municipal (Margules y Pressey, 2000). Particularmente, puede ser útil para el rediseño de planes de desarrollo y ordenamiento territorial en los municipios de Aquismón, Cd. del Maíz, El Naranjo, Tamasopo, Santa Catarina y Xilitla, donde existen grandes extensiones de vegetación en buen estado de conservación, pero conforme a los hallazgos documentados en esta investigación, son vulnerables a los cambios

en el uso de suelo, de acuerdo con el análisis de tendencias.

A nivel regional, se deben buscar alternativas de desarrollo que permitan mitigar los procesos de cambio y deforestación, de forma que se hagan compatibles los intereses de los sistemas socioeconómicos y ambientales (Carrafa y col., 2015). El escenario es complejo y se requiere transitar hacia un esquema de gobernanza ambiental, que permita una gestión participativa, donde se involucren actores de los distintos sectores, como representantes del gobierno, de instituciones académicas y organizaciones de la sociedad civil (Sarukhán y col., 2015), así como los propietarios, comuneros y miembros de los distintos grupos étnicos existentes, entre otros; de forma que se garantice el acceso a los procesos de toma de decisiones y se facilite la apropiación y el empoderamiento de las iniciativas de conservación en la región. Si bien, este trabajo se desarrolló en una región con características particulares y una realidad específica, provee de un marco general para desarrollar evaluaciones cuantitativas que den soporte al desarrollo de acciones de conservación en otras zonas, tanto a nivel nacional como internacional.

CONCLUSIONES

En las Áreas Naturales Protegidas (ANP), que se encuentran en el corredor de la Sierra Madre Oriental (SMO), se presentan cambios en el uso de suelo que afectan las coberturas de selvas, bosques y matorrales existentes. Esta situación puede generar amenazas a los obje-

tos de conservación definidos para las ANP estudiadas y derivar en impactos negativos para el desarrollo sustentable de la región y las comunidades. Las proyecciones a futuro en la SMO prevén transformaciones a lo largo del corredor que conforma la sierra, lo que pone en riesgo la integridad ecosistémica y la conectividad de áreas de distribución para distintas especies. Por lo anterior, se sugiere trabajar en la elaboración de los programas de manejo particulares para las distintas ANP e implementar acciones que reviertan las tendencias de cambio, a través del fortalecimiento de capacidades institucionales y locales, para el aprovechamiento sustentable de los recursos asociados a las cubiertas vegetales en la zona. El uso de información, espacialmente explícita, y los modelos generados proporcionan elementos para rediseñar o actualizar las políticas locales en materia de gestión territorial ambiental y de conservación de la biodiversidad, como primer paso para mitigar la vulnerabilidad ante los cambios actuales y futuros en los ecosistemas de la Sierra Madre Oriental y las ANP ubicadas en esta región.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la revisión hecha por Sara Monserrat Sánchez González. La realización de este trabajo fue posible gracias al apoyo otorgado por el CONACYT (Convenio: FOMIX/SEMARNAT/CONACYT 2006-C01-23754) y la Universidad Autónoma de San Luis Potosí a través del Programa Multidisciplinario de Posgrado en Ciencias Ambientales (PMPCA).

REFERENCIAS

- Bonham, C. (1994). *Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS*. New York: Pergamon. 414 Pp.
- CBD, Convention on Biological Diversity (2012). Convention on Biological Diversity. Aichi Biodiversity Targets. [En línea]. Disponible en: <https://www.cbd.int/sp/targets/>. Fecha de consulta: 28 de mayo de 2012.
- Camacho-Sanabria, J. M., Juan, J. I., Pineda, N. B., Cadena, E. G., Bravo, L. C. y Sánchez, M. (2015). Cambios de cobertura/uso de suelo en una porción de la zona de transición mexicana de montaña. *Madera y Bosques*. 21(1): 93-112.
- Carrara, E., Arroyo-Rodríguez, V., Vega-Rivera, J., Shondube, J., De-Freitas, S., and Fahrig, L. (2015). Impact of landscape composition and configuration on forest specialist and generalist bird species in the fragmented Lacandona rainforest, Mexico. *Biological Conservation*. 184: 117-126.
- CESMO, Corredor Ecológico de la Sierra Madre Oriental (2016). Corredor Ecológico de la Sierra Madre Oriental. [En línea]. Disponible en: <http://www.cesmo.mx/que-es-el-cesmo.html>. Fecha de consulta: 9 de enero de 2017.
- Chapa, V. L. and Monzalvo, S. K. (2012). Natural protec-

- ted areas of San Luis Potosí, México: ecological representativeness, risks, and conservation implications across scales. *International Journal of Geographic Information Science*. 26(9): 1625-1641.
- Clark-Labs (2012). IDRISI Selva Manual Version 17. [En línea]. Disponible en: <http://www.clarklabs.org>. Fecha de consulta: 10 de agosto de 2014.
- CONABIO, Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la Biodiversidad (2015). Estrategia Nacional sobre Biodiversidad de México. [En línea]. Disponible en: <http://www.conabio.gob.mx/>. Fecha de consulta: 15 de junio de 2015.
- CONANP, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (2010). Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. [En línea]. Disponible en: http://sig.conanp.gob.mx/website/pagsig/info_shape.htm. Fecha de consulta: 10 de diciembre de 2010.
- CONANP, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (2013). *Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas - Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. Programa de Adaptación al Cambio Climático Región Central de la Sierra Madre Oriental*. México, D.F.: CONANP, GIZ. 108 Pp.
- CONANP, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (2015). Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. [En línea]. Disponible en: <http://www.conanp.gob.mx>. Fecha de consulta: 15 de julio de 2015.
- CONAPO, Consejo Nacional de Población (2010). *Consejo Nacional de Población. Índice de marginación por entidad federativa y municipio*. México D.F.: CONAPO. 54 Pp.
- Delphin, S., Escobedo, F. J., Abd-Elrahman, A., and Cropper, W. P. (2016). Urbanization as a land use change driver of forest ecosystem services. *Land Use Policy*. 54: 188-199.
- DOF, Diario Oficial de la Federación (2010). Diario Oficial de la Federación. Norma Oficial Mexicana NOM- 059-SEMARNAT-2010. Protección ambiental-especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, en exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo. [En línea]. Disponible en: http://www.profepa.gob.mx/innova-portal/file/435/1/NOM_059_SEMARNAT_2010.pdf. Fecha de consulta: 20 de julio de 2014.
- DOF, Diario Oficial de la Federación (2014). Diario Oficial de la Federación. Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. [En línea]. Disponible en: <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/pdf/wo83191.pdf>. Fecha de consulta: 10 de agosto de 2014.
- Eastman, J. R. (2012). *IDRISI Selva Manual*. Clark University: Clark Labs. 322 Pp.
- Esri (2008). ArcMap 9.3. License Type ArcInfo. Geographic Information System. [En línea]. Disponible en: www.esri.com. Fecha de consulta: 22 de marzo de 2008.
- Farfán, M. G., Rodríguez-Tapia, G. y Mas, J. F. (2016). Análisis jerárquico de la intensidad de cambio de cobertura/uso de suelo y deforestación (2000-2008) en la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán, México. *Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*. (90): 89-104.
- Figueroa, F. and Sánchez-Cordero, V. (2008). Effectiveness of natural protected areas to prevent land use and land cover change in Mexico. *Biodiversity and Conservation*. 17(13): 3223-3240.
- Galicia, L., Cuevas, M. L., Merit, L. y Couturier, S. (2014). Deteción de cambio ambiental en selvas y bosques de México con percepción remota: Un enfoque multiescalar de espacio y tiempo. *Interciencia*. 39(6): 368-374.
- García, G. G., March, I. M. y Castillo, M. A. (2001). Transformación de la vegetación por cambio de uso de suelo en la Reserva de la Biosfera Calakmul, Campeche. *Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*. (46): 45-57.
- Geist, H. J. and Lambin, E. F. (2002). Proximate causes and underlying driving forces of tropical deforestation. *BioScience*. 52(2): 143-150.
- Godoy, M. M. G. and Soares-Filho, B. S. (2008). Modelling intra-urban dynamics in the Savassi neighbourhood, Belo Horizonte city, Brazil. In M. Paegelow and M. T. Camacho-Olmedo (Eds.), *Modelling Environmental Dynamic, Advances in Geomatic Solutions, Parte 2*. Environmetal Science (pp. 318-338). Berlin Heidelberg, Germany: Springer-Verlag.
- Guerrero, G., Maser, O., and Mas, J. F. (2008). Land use/land cover change dynamics in the Mexican Highlands: current situation and long term scenarios. In M. Paegelow and M. T. Camacho (Eds.), *Modelling Environmental Dynamics: Advances in Geomatic Solutions. Environmental Science and Engineering* (pp. 57-76). Berlin Heidelberg, Germany: Springer-Verlag.
- Halffter, G. (2011). Reservas de la biosfera: Problemas y oportunidades. *Acta Zoológica Mexicana*. 27(1): 177-189.
- Illoldi-Rangel, P., Trevor, F., Linaje, M., Pappas, C., Sánchez-Cordero, V., and Sarkar, S. (2008). Solving the maximum representation problem to prioritize areas for the conservation of terrestrial mammals at risk in Oaxaca. *Diversity and Distributions*. 14(3): 493-508.
- Ilwis (2012). ILWIS Documentation version 3. [En línea]. Disponible en: <http://www.itc.nl/ilwis/documentation/version3.asp>. Fecha de consulta: 11 de febrero de 2012.
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2003). Síntesis de Información Geográfica del Estado de San Luis Potosí. [En línea]. Disponible en: www.inegi.gob.mx. Fecha de consulta: 17 de abril de 2014.
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2010). Censo de Población y Vivienda 2010. [En línea]. Disponible en: <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/ccpv/cpv2010/Default.aspx>. Fecha de consulta: 19 de octubre de 2014.

- Jensen, J. (1996). *Introductory digital image processing: A remote sensing perspective* (Segunda edición). Upper Saddler River: NJ Prentice-Hall 61 Pp.
- Lambin, E. F., Geist, H. J., and Lepers, E. (2003). Dynamics of land-use and land-cover change in tropical regions. *Annual Review of Environmental Resources*. 28(1): 205-241.
- Leemans, R. y de-Groot, R. S. (2005). *Millennium Ecosystem Assessment, Ecosystems and Human Well-Being: A framework for assessment*. Washington, DC: Island Press. 245 Pp.
- Leija-Loredo, E., Reyes-Hernández, H., Fortanelli-Martínez, J. y Palacio-Aponte, G. (2011). Situación actual del bosque de niebla en el estado de San Luis Potosí, México. *Investigación y Ciencia*. 53: 3-11.
- Lillesand, T. M., Keiffer, R. W., and Chipman, J. W. (2015). *Remote sensing and image interpretation* (7th edition). United States of America: WILEY John Wiley and Sons Inc. 736 Pp.
- Loa, L. E., Sánchez, H. M. D., Torres, J. J. G., Rosas, R. O. C. y Sierra, R. M. S. (2009). *Áreas prioritarias para el manejo y conservación en el estado de San Luis Potosí*, México. México: Secretaría de Desarrollo Agropecuario y Recursos Hídricos. 152 Pp.
- Luna, I., Morrone, J. J. y Espinosa, D. (2004). *Biodiversidad de la Sierra Madre Oriental*. México D.F.: Las Prensas de Ciencias, Facultad de Ciencias, UNAM. CONABIO. 527 Pp.
- Margules, C. R. and Pressey, R. L. (2000). Systematic conservation planning. *Nature*. 405: 242-253.
- Martínez-Meyer, E., Sosa-Escalante, J. y Álvarez, F. (2014). El estudio de la biodiversidad en México: ¿una ruta con dirección?. *Revista Mexicana de Biodiversidad*. 85: 51-59.
- Mas, J. F. y Flamenco, S. A. (2011). Modelación de los cambios de cobertura/uso de suelo en una región tropical de México. *Geo-Tropico*. 5(1): 1-24.
- Mas, J. F., Velázquez, A. y Couturier S. (2009). La evaluación de los cambios de cobertura/uso de suelo en la República Mexicana. *Investigación ambiental*. 1(1): 23-39.
- Mas, J. F., Velázquez, A., Días-Gallegos, R. J., Mayorga-Saucedo, R., Alcantara, C., Bocco, G., ..., and Pérez-Vega, A. (2004). Assessing land use/cover changes: a nation wide multidecadal spatial database for Mexico. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 5(4): 249-261.
- Meave, J. A., Romero-Romero, M. A., Salas-Morales, S. H., Pérez-García, E. A. y Gallardo-Cruz, J. A. (2012). Diversidad, amenazas y oportunidades para la conservación del bosque tropical caducifolio en el estado de Oaxaca, México. *Ecosistemas*. 31(1-2): 85-100.
- Menon, S., Pontius, R. Rose, J. J., Khan, M. L., and Bawa, K. S. (2001). Identifying conservation priority areas in the tropics: a land-use change modeling approach. *Conservation Biology*. 15(2): 501-512.
- Metzger, M. J., Roosevelt, M. D. A., Acosta-Michlik, L., Leemans, R., and Shrötter, D. (2006). The vulnerability of ecosystem services to land use change. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 114(1): 69-85.
- Miranda-Aragón, L., Treviño-Garza, E. J., Jiménez-Pérez, J., Aguirre-Calderón, O. A., González-Tagle, M. A., Pompa-García, M. y Aguirre-Salado, C. A. (2013a). Monitoreo de la deforestación mediante técnicas geomáticas en el centro-norte de México. *Ciencia UANL*. 16(4): 43-54.
- Miranda-Aragón, L., Treviño-Garza, E. J., Jiménez-Pérez, J., Aguirre-Calderón, O. A., González-Tagle, M. A., Pompa-García, M. y Aguirre-Salado, C. A. (2013b). Tasas de deforestación en San Luis Potosí, México (1993-2007). *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 19(2): 201-215.
- Molina-Guerra, V., Pando-Moreno, M., Alanís-Rodríguez, E., Canizales-Velázquez, P., González, H. y Jiménez-Pérez, J. (2013). Composición y diversidad vegetal de dos sistemas de pastoreo en el matorral espinoso tamaulipeco del Noreste de México. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*. 4(3): 361-371.
- Ochoa-Ochoa, L., Urbina-Cardona, J. N., Vázquez, L. B., Flores-Villela, O., and Bezaury-Creel, J. (2009). The effects of governmental protected areas and social initiatives for land protection on the conservation of Mexican amphibians. *PLoS ONE*. 4(9): e6878.
- ONU, Organización de las Naciones Unidas (2010). Objetivos de desarrollo del Milenio, Naciones Unidas, in *ODM*. [En línea]. Disponible en: www.un.org. Fecha de consulta: 25 de noviembre de 2010.
- Pebesma, E. J. and Wesseling, C. G. (1998). Gstat: a program for geostatistical modelling, prediction and simulation. *Computers & Geosciences*. 24(1): 17-31.
- Pérez-Verdín, G., Kim, Y. S., Hoshodarsky, D., and Tecle, A. (2009). Factors driving deforestation in common pool resources in northern Mexico. *Journal of Environmental Management*. 90(1): 331-340.
- Pijanowski, B. C., Brown, D. G., Manik, G. A., and Shelloo, B. A. (2002). Using neural networks and GIS to forecast land use changes: a land transformation model. *Computers, Environment and Urban Systems*. Versión 7. 26(6): 553-575.
- Ramírez-Albores, J. E. (2010). Diversidad de aves de hábitats naturales y modificados en un paisaje de la depresión central de Chiapas, México. *Revista de Biología Tropical*. 58(1): 511-528.
- RAN, Registro Agrario Nacional (2010). Registro Agrario Nacional. SRA, Secretaría de la Reforma Agraria. México. [En línea]. Disponible en: <http://www.ran.gob.mx/ran/index.php>. Fecha de consulta: 22 de octubre de 2010.
- Reyes-Hernández, H., Aguilar, R. M., Aguirre, R. J. R. y Trejo, V. I. (2006). Cambios en la cubierta vegetal y uso de suelo en el

- área del proyecto Pujal-Coy, San Luis Potosí, México, 1973-2000. Investigaciones Geográficas. *Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*. (59): 26-42.
- Reyes-Hernández, H., Aguilar-Robledo M., Fortanelli-Martínez J., Mass-Caussel J. F., Montoya-Toledo, J. N., Sahagún-Sánchez, F. J. y Vázquez-Villa B. M. (2010). Dinámica espacio-temporal de la deforestación en la Sierra Madre Oriental de San Luis Potosí y escenarios futuros. Los procesos de deforestación en la huasteca potosina, sus implicaciones ante el cambio climático y escenarios futuros, en *Informe técnico FOSEC: SEMARNAT-CONACYT, C06-23754*. San Luis Potosí, México. SEMARNAT-CONACYT. 15 Pp.
- Reyes-Hernández, H., Leija-Loredo, G., Sahagún-Sánchez, F. J. y Montoya-Toledo, N. (2013). Situación actual y escenarios futuros de los procesos de deforestación en la Sierra Madre Oriental, San Luis Potosí, México. Análisis basado en geotecnologías y métodos participativos. En C. Morera, M. Romero y L. F. Sandoval (Eds.), *Geografía, Paisaje y Conservación* (pp. 129-160). Heredia, Costa Rica: Universidad Nacional de Heredia, Campus Omar Dengo, Costa Rica e Instituto Panamericano de Geografía e Historia.
- Rosas, H. A. (2008). Una ruta metodológica para evaluar la capacidad institucional. *Política y Cultura*. 30: 119-134.
- Sahagún-Sánchez, F. J., Reyes, H., Flores, J. L., and Chapa, L. (2011). Modelización de escenarios de cambio potencial en la vegetación y el uso de suelo en la Sierra Madre Oriental de San Luis Potosí, México. *Journal of Latin American Geography*. 10(2): 65-86.
- Sahagún-Sánchez, F. J., Catro-Navarro, J. and Reyes-Hernández, H. (2013). Distribución geográfica de la avifauna en la Sierra Madre Oriental, México: un análisis regional de su estado de conservación. *Journal of Tropical Biology and Conservation*. 61(2): 897-925.
- Sánchez-Cordero, V. y Figueroa, F. (2007). La efectividad de las reservas de la biosfera en México para contener procesos de cambio en el uso de suelo y la vegetación. En G. Halffter, S. Guevara y A. Melic (Eds.), *Hacia una cultura de la conservación de la diversidad biológica*. (pp. 161-171). Zaragoza, España: S.E.A. Sociedad Entomológica Aragonesa.
- Sánchez-Cordero, V., Illoldi-Rangel, P., Escalante, T., Figueroa, F., Rodríguez, G., Linaje, M., and Sarkar, S. (2009). Deforestation and biodiversity conservation in México. In A. M. Columbus and L. Kuznetsov (Eds.), *Endangered Species: New Research* (pp. 279-297). New York, USA: Nova Science Publishers, Inc.
- Sarukhán, J., Urquiza-Haas, T., Koleff, P., Carabias, J., Dirzo, R., Ezcurra, E., ..., and Soberón, J. (2015). Strategic actions to value, conserve, and restore the natural capital of mega diversity countries: The case of Mexico. *BioScience*. 65(2): 164-173.
- SEDARH, Secretaría de Desarrollo Agropecuario y Recursos Hidráulicos (2015). Portal campo campesino. [En línea]. Disponible en: <http://189.203.18.43/campopotosino/>. Fecha de consulta: 2 de enero de 2015.
- SEMARNAT, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2015). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. [En línea]. Disponible en: www.semarnat.gob.mx. Fecha de consulta: 26 de febrero de 2015.
- Soares-Filho, B. S., Pennachin, C. L., and 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., Rodriguez, H. O., and Costa, W. L. (2009). *Modeling Environmental Dynamics with Dinamica EGO*. Centro de Sensoriamento Remoto. Brazil: Universidad Federal de Minas Gerais. 114 Pp.
- Sotelo-Caro, O., Chichia-González, J., Sorani, V. y Flores-Palacios, A. (2015). Cambios en la dinámica de deforestación de la subcuenca de un río en México: la imposibilidad de recuperación de los hábitat originales después del cese de la deforestación. *Revista de Geografía Norte Grande*. 61: 221-227.
- SRTM, Shuttle Radar Topography Mission (2011). The Mission to Map the World. [En línea]. Disponible en: <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/index.html>. Fecha de consulta: 13 de agosto de 2011.
- Trejo, I. and Dirzo, R. (2000). Deforestation of seasonally dry tropical forest: a national and -local analysis in Mexico. *Biological Conservation*. 94(2): 133-142.
- Turner II, B. L., Lambin, E. F., and Reenberg, A. (2007). The emergence of land change science for global environmental change and sustainability, in *PNAS*. [En línea]. Disponible en: <http://www.pnas.org>. Fecha de consulta: 18 de marzo de 2012.
- Yáñez-Arenas, C., Mandujano, S., Martínez-Meyer, E., Pérez-Arteaga, A. y González-Zamora, A. (2012). Modelación de la distribución potencial y el efecto del cambio de uso de suelo en la conservación de los ungulados silvestres del Bajo Balsas, México. *Therya*. 3(1): 67-79.
- Zavala, M. A., Díaz-Sierra, R., Purves, D., Zea, G. E. y Urbieto, I. R. (2008). Modelos espacialmente explícitos, en *Ecosistemas*. [En línea]. Disponible en: <http://www.revistaecosis temas.net>. Fecha de consulta: 18 de agosto de 2010.