



El presente artículo está basado en la investigación "Monitoreo de la deforestación mediante técnicas geomáticas en una porción de la región Centro-Norte de México", galardonada con el Premio de Investigación UANL 2013, en la categoría de Ciencias Naturales, otorgado en sesión solemne del Consejo Universitario, en septiembre de 2013.

Monitoreo de la deforestación mediante técnicas geomáticas

en el centro-norte de México

LILIANA MIRANDA ARAGÓN*, EDUARDO JAVIER TREVIÑO GARZA**, JAVIER JIMÉNEZ PÉREZ**, ÓSCAR AGUIRRE CALDERÓN**, MARCO AURELIO GONZÁLEZ TAGLE**, MARÍN POMPA GARCÍA***, CARLOS ARTURO AGUIRRE SALADO****



Premios de investigación UANL 2013

Una considerable preocupación relacionada con el cambio climático global se ha incrementado durante las últimas dos décadas, particularmente durante los últimos cinco años, ya que cada día son más patentes las noticias relacionadas con el tema en los medios de comunicación. Los impactos de las actividades humanas en el clima, causadas por el consumo extensivo de combustibles fósiles, son un factor importante

* Universidad Autónoma de San Luis Potosí, FAV.

** Universidad Autónoma de Nuevo León, FCF.

Contacto: eduardo.trevinogr@uanl.edu.mx

***Universidad Juárez del estado de Durango, FCF.

****Universidad Autónoma de San Luis Potosí, FI.

para los tomadores de decisiones, debido a sus implicaciones económicas y geopolíticas. Otros factores críticos, como la deforestación, la pérdida de la biodiversidad, la contaminación del agua o la erosión del suelo son frecuentemente menos reportados, quizá porque tienen un menor impacto directo en el desarrollo de las economías. Sin embargo, son los signos más evidentes del cambio global.¹

Desde mediados de los años setenta, se ha reconocido que los cambios en el uso del suelo modifican el albedo superficial y, por consiguiente, el intercambio de energía entre la superficie y la atmósfera, para alterar finalmente la temperatura en el clima global. Después, a principios de los ochenta, se reconoció a los ecosistemas terrestres como fuentes y sumideros de carbono, y salió a la luz el impacto que tiene la deforestación.²

Una manera de monitorear dichos cambios ha sido aprovechando el avance considerable de los últimos 20 años en el desarrollo de herramientas computacionales orientadas al estudio de los recursos naturales, desde técnicas estadísticas para el modelado de fenómenos, captación de imágenes de la superficie terrestre mediante sensores satelitales, e inclusive el desarrollo de software para el procesamiento de dichas imágenes en el estudio de la cobertura.³

La presente investigación tuvo como objetivo analizar el proceso de deforestación mediante el uso de herramientas geomáticas en las diferentes zonas biogeográficas del estado de San Luis Potosí; asimismo, determinar las zonas potenciales para el establecimiento de plantaciones forestales comerciales. El enfoque de análisis se realizó al estratificar la información geoespacial para cada zona del estado: 1) Altiplano, 2) Centro, 3) Media, 4) Huasteca.

Este análisis se realizó, en primera instancia, con el estudio de los procesos de deforestación mediante la intersección espacial de mapas temáticos de la Serie II (1993) y IV (2007) de vegetación y uso del

suelo, generados por el INEGI para cada una de las zonas biogeográficas del estado de San Luis Potosí: 1) Altiplano, 2) Centro, 3) Media, 4) Huasteca.

En una segunda etapa, se detectaron los cambios ocurridos durante el periodo 2000-2010, mediante el uso de imágenes satelitales en series de tiempo del sensor MODIS y con la técnica de estadística multivariada de análisis de componentes principales.

Se consideró como hipótesis que durante los últimos 15 años han existido cambios en el uso del suelo, principalmente representados por la deforestación en las diferentes zonas biogeográficas del estado de San Luis Potosí. La segunda que la vegetación forestal ha perdido superficie anualmente, lo cual puede modelarse mediante imágenes anuales, simulando una serie de tiempo.

Antecedentes

Los cambios en la vegetación y el uso del suelo son inherentemente espaciales y dinámicos. La magnitud y el impacto son tales que se reconocen globalmente, de manera que esta dinámica se reconoce también como uno de los grandes retos en la ciencia ambiental. Una variedad de investigaciones de cambio de uso del suelo realizados para periodos de análisis abarca los últimos 30 años, con imágenes de satélite,⁴⁻⁹ y también para periodos mayores.^{10,11} Estos proyectos individuales no sólo han identificado las transiciones comunes en la vegetación y el uso del suelo, sino que también han estudiado las causas de dichos cambios; asimismo, la dinámica del uso del suelo ha sido abordada en diferentes investigaciones, sobre todo si sus objetivos son el conocimiento mejorado de los procesos y los cambios producidos.^{12,14}

Es común encontrar en la bibliografía formas novedosas de estudiar el uso del suelo y sus cambios mediante nuevos diseños observacionales y experimentales, así como protocolos de investigación que

apoyan análisis de cambio cualitativos y cuantitativos;¹⁵ para finalmente comparar mejor los resultados de diferentes estudios de caso. Esto ha sido posible, en parte por la disponibilidad de mediciones espacio-temporales consistentes y exhaustivas, que apoyan el desarrollo de la historia espacial y temporal de la vegetación y el uso del suelo de diferentes lugares en todo el mundo, además de la rápida evolución de los algoritmos incluidos en los diferentes programas computacionales relacionados con los sistemas de información geográfica, percepción remota y estadística.

La deforestación, uno de los problemas ambientales más serios de los últimos tiempos, es tema de interés mundial debido a la importancia de los bosques y selvas por los diferentes servicios ambientales que proveen, como: *a)* producción de agua, *b)* almacenamiento y captura de carbono, *c)* conservación de la biodiversidad, *d)* belleza escénica. La deforestación también afecta las actividades económicas y amenaza el sustento de la vida y la integridad cultural de las personas que dependen de los bosques; además crea problemas, como degradación de suelos, inundaciones y azolve de los cuerpos de agua e infraestructura hidráulica.^{16,17}

La deforestación ocurre en mayor medida en países en vías de desarrollo, donde el nivel de bienestar de los ciudadanos es un factor crucial en la determinación del tamaño de las áreas deforestadas. La pobreza, la sobrepoblación y la deuda externa acentúan la deforestación en muchos de los países tropicales con bajo producto interno bruto.^{18,19} Los requerimientos del crecimiento económico resultan en el incremento de la demanda de productos agrícolas y forestales. Esta tendencia no es tan común en países desarrollados y tiene una diferente lógica de crecimiento, además se caracteriza como una curva en forma de U invertida que relaciona el crecimiento del producto interno bruto y la calidad del ambien-

te. En la bibliografía reciente, este modelo se conoce como *la curva ambiental de Kuznets (Kuznets curve)*²⁰ o también es referida como la hipótesis de transición forestal (*forest transition hypothesis*).²¹

La Tierra está cambiando a un ritmo nunca antes visto, esta evolución requiere documentarse mediante imágenes completas y repetibles. Las herramientas de la observación terrestre juegan un papel clave en la producción de estimaciones reales de los cambios del paisaje. En este sentido, se requieren mediciones consistentes, fiables y precisas de la dinámica de la vegetación y uso del suelo para mejorar nuestro entendimiento de cómo funcionan los diferentes elementos del sistema.²² El ámbito político también requiere dicha información, ya que los acuerdos ambientales internacionales, como las convenciones de Río (Convención de las Naciones Unidas para el Cambio Climático, la Convención para el Combate de la Desertificación y la Convención para la Diversidad Biológica), entre otras, reportan obligaciones en torno al cambio de la vegetación y el uso del suelo y condicionan las nuevas decisiones políticas asociadas a estas convenciones.¹⁹

Los recursos de la Tierra tienen un alto valor económico, pero esto no durará si se sobreexplotan o se manejan irracionalmente.^{4,9} Los programas de apoyo requieren conocer la condición anterior, actual y quizá futura del uso del suelo, para el desarrollo de políticas y estrategias operacionales y para dirigir el uso de los recursos; para llegar a una meta a largo plazo de alcanzar el manejo sustentable de los recursos forestales, como parte de los esfuerzos para erradicar la pobreza en las regiones en desarrollo del mundo.^{7,9,23}

Diferentes agencias espaciales publican grandes conjuntos de datos, y representan un material base para una mejor caracterización de la vegetación y el uso del suelo.²⁴⁻²⁶ Mientras tanto, los científicos se desarrollan técnicas para refinar las mediciones, y

quienes hacen política comienzan a incluir tales diagnósticos en sus decisiones.²⁷

Desde el comienzo de 1970, las técnicas de percepción remota se han aplicado exitosamente al mapeo local, nacional, continental e incluso global de la vegetación. En otras palabras, resulta evidente la utilidad de los mapas de uso de suelo para el manejo y la planeación de los recursos naturales desde escalas locales a nacionales. A escala global, la caracterización confiable de la vegetación es una importante variable de entrada para los modelos de circulación global, permite mejorar nuestro entendimiento sobre la manera en que funciona la biosfera y para modelar escenarios climáticos futuros.¹¹

La disponibilidad de colecciones globales de datos espaciales detallados, como Landsat, combinados con mejoras en el procesamiento y almacenamiento, ha diseminado su uso para el mapeo regional y nacional.^{24, 27} Aunque es muy difícil conseguir imágenes de alta resolución espacial de una misma fecha para regiones amplias de estudio.

Para aprovechar la capacidad numérica de los valores registrados en las imágenes satelitales, se han desarrollado diferentes métodos para examinar y clasificar estadísticamente los píxeles individuales, y a través de series de tiempo caracterizar su comportamiento espectral.²⁸ Los *clusters* pueden ser entrenados mediante el uso de datos de campo (clasificación supervisada) o estadísticos (clasificación no supervisada).

Una vez clasificada la imagen, resulta imperativo y fundamental estimar la confiabilidad del mapa, lo cual se realiza mediante la elaboración de matrices de confusión, contingencia o error.²⁹ Sin embargo, el levantamiento de datos para la validación de estos mapas puede ser problemático por causas diversas, como: *a)* el tamaño del área de interés, *b)* la diversidad de ecosistemas, *c)* la falta de un sistema de clasificación (leyenda) homogéneo y no menos impor-

tante, *d)* los costos económicos de tales actividades. Aunque parece complicado, la validación de los mapas es de suma importancia para conocer los alcances y limitaciones de la información que se genera, la cual finalmente sirve para emitir opiniones o decidir políticas de manejo de los recursos naturales.

Área de estudio

Se enmarca entre las coordenadas geográficas 24° 29' 27" N a 21° 09' 33" N y 98° 19' 48" O a 102° 18' 10" O, cuenta con una superficie de 6'116,360.9 ha, y representa 3.1% de la superficie de México. SLP se divide en cuatro zonas biogeográficas (figura 1): Altiplano, Media, Centro y Huasteca; están distribuidas en 58 municipios y con diversas características fisiográficas por el gradiente altitudinal propiciado por la Sierra Madre Oriental en la parte Oeste. El fenómeno de barlovento-sotavento provoca que la precipitación escurra hacia el Golfo de México, que favorezca a la zona Huasteca y determine en gran medida la vegetación tropical que ahí se desarrolla. Por su parte, en la zona Altiplano, los vientos llegan sin la humedad suficiente para que haya una precipitación regular, limitando al desarrollo de matorrales

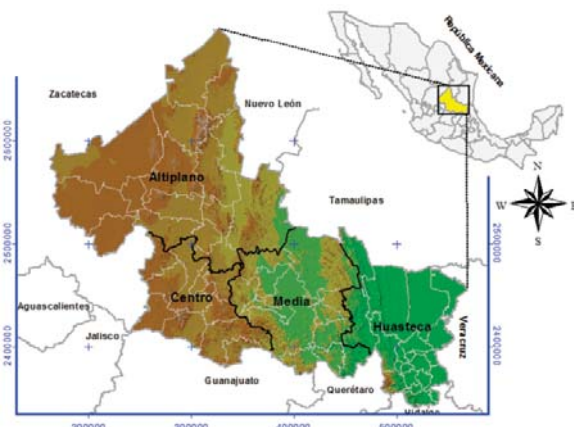


Fig. 1. Ubicación del área de estudio.

y vegetación arbustiva. La zona Centro es una transición entre la zona Altiplano y Media, mientras que la zona Media resulta como la transición entre el Altiplano y la Huasteca.

Materiales

Se utilizó el conjunto de datos vectoriales de la carta de uso del suelo y vegetación de la serie II (1993; figura 2) y IV (2007; figura 3), escala 1:250,000. Las cartas y sus claves son como sigue: Fresnillo (F13-3), Zacatecas (F13-6), Matehuala (F14-1), San Luis Potosí (F14-4), Ciudad Mante (F14-5), Guanajuato (F14-7), Ciudad Valles (F14-8) y Concepción del Oro (G14-10). Dicha información fue generada por el Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI), mediante la fotointerpretación de 120 imágenes de satélite Landsat para todo el territorio nacional, y fue validada mediante visitas de campo. Dado que ambas series presentaban un desfase espacial aproximadamente consistente ($X: -30$ m $Y: +60$ m) que no obedecía a la posible diferencia entre *datum* (NAD27 e ITRF92), se ajustaron con el procedimiento de georreferenciación de vectores en AutoCAD Map, donde se emplearon doce puntos de control (X_{origen} , Y_{origen} y $X_{destino}$, $Y_{destino}$) distribuidos en todo el estado, y se obtuvo un error aceptable para la escala del trabajo (0.33 m). También se empleó el Marco Geoestadístico Municipal, versión 2009 del INEGI v.4.1, como referencia de los límites políticos de la zona de estudio. Toda la información se manejó en la proyección UTM, zona 14, datum ITRF92.

Para validar las series de vegetación, se construyeron dos matrices de confusión mediante los datos de las series II (1993) y IV (2007), con los datos correspondientes a 330 sitios de muestreo obtenidos del Inventario Forestal Nacional (2004-06). Se calculó la precisión de la cartografía para cada uno de los

tipos de vegetación y uso del suelo, a nivel global y el índice de Kappa ().

Se estandarizó la leyenda de ambas series de vegetación con los criterios de (36), con tres niveles de clasificación: (i) formación, (ii) tipo de vegetación, (iii) uso del suelo y comunidad y otras coberturas. Para este trabajo se empleó el nivel de clasificación ii. Lo anterior se realizó generando un nuevo campo dentro de la base de datos del archivo vectorial, y se asignaron las clases encontradas a las nuevas categorías.

Para el análisis de cambio, se realizaron las matrices de cambio y se generaron en Idrisi Kilimanjaro con máscaras booleanas para cada zona. Para esto se rasterizaron los tipos de vegetación y uso del suelo de cada fecha de análisis, con un píxel de 50 m x 50 m como unidad de análisis.

Se calculó la tasa de cambio para cada tipo de vegetación y uso del suelo con la fórmula $TC = ((S2/S1)(1/n)-1) \times 100$; donde TC: tasa de cambio, $S1$ = superficie en el año inicial, $S2$ = superficie en el año final, n : número de años en el periodo de análisis. El valor positivo indica ganancia de superficie, mientras que un valor negativo indica pérdida. Se calculó el cambio total de cada clase temática referido al área estatal con la fórmula $CTE = (S2/A) \times 100$, donde A = Área total. Para el caso de la tasa de deforestación (TD) se empleó la misma fórmula de la tasa de cambio, con la diferencia de que los valores tomados de la suma del área de todos los tipos de bosques, selvas y matorrales.

El mapa de cambio se realizó mediante la intersección espacial de los vectores, y la generación de dos columnas en la base de datos del nuevo mapa vectorial: *a*) cambio detectado en los tipos de vegetación y uso del suelo resultado de concatenar los campos del tipo de vegetación y *b*) indicador de cambio y su etiquetado con base en la siguiente lógica: CON: conservación, vegetación natural que permaneció en

los dos periodos; REC: recuperación, vegetación que aumentó su densidad forestal o uso del suelo que migró a una vegetación natural; DEF: deforestación, pérdida de territorio arbolado como bosques, selvas y matorral; DEG: degradación, cambio de una cobertura degradada a una más degradada como pastizal a áreas sin vegetación; SC: sin cambio, clases temáticas antrópicas que permanecieron intactas en el periodo de análisis, y FC: falso cambio, cambios ilógicos en el uso del suelo, ocasionados por un error de etiquetado en las fuentes de información.

Para analizar los cambios ocurridos entre 2000 y 2010, se seleccionó el producto MCD43A4 que se obtiene combinadamente del sensor MODIS instalado en los satélites Aqua y Terra; contiene valores de reflectancia (ρ) ajustada al nadir (NBAR, por sus siglas en inglés) mediante una función de distribución de reflectancia bidireccional. MCD43A4 integra datos multifecha tomados durante periodos de 16 días para minimizar la presencia de nubes, y además se encuentra corregido atmosféricamente. Tiene una resolución espacial de 500 m y una resolución espectral de siete bandas distribuidas en las siguientes longitudes de onda: 1. Rojo (620-670 nm), 2. Infrarrojo cercano (841-876 nm), 3. Azul (459-479 nm), 4. Verde (545-565 nm), 5. Infrarrojo medio1 (1230-1250 nm), 6. Infrarrojo medio2 (1628-1652 nm), 7. Infrarrojo medio3 (2105-2155 nm).³⁰ Para este trabajo se emplearon datos espectrales correspondientes a once años desde 2000 (39 imágenes por año) hasta 2010 (45 imágenes por año en diez años, en periodos de cada 16 días), obtenidos de la interface denominada MODIS Reprojection Tool (MRTWeb).³¹ Estos datos, obtenidos para las coordenadas extremas del área de interés, fueron reproyectados al sistema UTM-14N.

La metodología para el monitoreo de la variación interanual de la vegetación se dividió en tres fases. En la fase 1 se calculó para cada imagen de cada fe-

cha el índice de vegetación de diferencias normalizadas $NDVI = (\rho_{irc} - \rho_{rojo}) / (\rho_{irc} + \rho_{rojo})$, donde ρ_{irc} = reflectancia en el infrarrojo cercano y ρ_{rojo} = reflectancia en el rojo. En la fase 2 se fusionaron las imágenes de NDVI correspondientes para cada uno de los años mediante el algoritmo del máximo valor compuesto (MVC) en una sola imagen de NDVI anual.^{32,33} Este método captura la variabilidad temporal intraanual de la vegetación en una sola imagen y minimiza la presencia residual de nubes o bruma bajo el supuesto que un alto valor de NDVI corresponde a un píxel cubierto por vegetación.

Para detectar la variación interanual se aplicó el ACP a la serie de tiempo. Este método fusiona las imágenes en un conjunto de nuevas variables (imágenes) que capturan la variabilidad temporal de la serie de tiempo. La primera variable generada o componente principal (PC1) recoge lo que es común en los años de análisis, mientras que el segundo componente (PC2) captura las anomalías o diferencias detectadas en la serie de tiempo. Un indicador de la fecha de los cambios detectados es la correlación o carga de cada componente con las imágenes anuales originales. La correcta interpretación de los componentes depende entonces de la correlación mencionada con la fecha de análisis y su signo (\pm). Si el signo de la carga es positivo, el valor del segundo componente se interpreta directamente, es decir, los valores positivos corresponden a ganancias en la vegetación, mientras que en valores negativos se interpretan como pérdidas en la vegetación (deforestación). Si el signo de la carga es negativo, el valor del segundo componente se interpreta de manera inversa; valores positivos corresponden a pérdidas de vegetación, mientras que valores negativos corresponden a ganancias en la vegetación. En la fase 3 se fusionaron las once imágenes de máximo NDVI anual (2000-2010), mediante ACP que recoge la variabilidad espacio-temporal de la radiometría de cada

píxel. Para determinar los cambios se clasificó el PC2, usando la desviación estándar de la media. Para este trabajo, el PC2 se dividió en cinco clases: 1. Degradación altamente probable (3σ a $4\sigma^-$), 2. Degradación poco probable (1σ a 2σ), 3. Sin cambio (μ), 4. Recuperación poco probable (1σ a $2\sigma^-$), 5. Recuperación altamente probable (3σ a $4\sigma^-$).

Para analizar la tendencia del NDVI con la precipitación anual, se emplearon datos de precipitación para un periodo de diez años (2000-2009), obtenidos de 54 estaciones seleccionadas que forman parte de la Red de Observatorios Meteorológicos, distribuidos en el estado de San Luis Potosí, México, y son administrados por la Comisión Nacional del Agua (CNA). Los datos de precipitación de 2010 no se incluyeron, debido a que aún se encontraban en etapa de procesamiento por la CNA. La correlación se llevó a cabo de dos maneras: 1) relación de la precipitación total anual y el máximo NDVI registrado en la imagen de satélite como un indicador de la dinámica de la vegetación y 2) comparación de los promedios anuales de precipitación y promedios anuales de NDVI. Para visualizar la serie de tiempo completa y analizar la tendencia temporal del NDVI, se graficaron los valores promedio de NDVI (2000-2010) de los píxeles que no presentaron ninguna nube durante el periodo de análisis, usando una máscara booleana construida con las 489 imágenes. El procesamiento de imágenes se realizó en el software IDRISI.³⁴

RESULTADOS

En el análisis realizado para la detección del cambio de uso del suelo en San Luis Potosí, se encontró que 88.3% del territorio permaneció sin cambio, mientras que 11.7% de la superficie presentó algún tipo de cambio. Los porcentajes que se indican en seguida fueron calculados con base en la superficie estatal

para propiciar su comparación entre sí y pudieran ser apreciados en la figura 4. La disminución fue especialmente marcada en el matorral, donde la pérdida alcanza 2.3%; a nivel nacional³⁶ reporta -0.33%. La selva perennifolia y caducifolia redujeron su tamaño en -0.4% y -0.2%, respectivamente, siendo ligeramente menores con la tasa nacional que fue de -0.76%; el pastizal también presentó un decremento considerable de -0.4%; y en menor grado, el mezquital con -0.1% de disminución. Las selvas han sido uno de los tipos de vegetación más afectados por el cambio de uso del suelo, ocasionado principalmente por las actividades agrícolas nómadas como roza-tumba-quema.³⁵

La deforestación ocurrida durante el periodo 1993-2007 fue de 77,017.3 ha (1.9%), que implica la pérdida del bosque de coníferas, bosque de latifoliadas, bosque mixto, selva perennifolia y subperennifolia, selva caducifolia y subcaducifolia, matorral y mezquital. Las clases temáticas que incrementaron su área proveniente de la vegetación arbolada fueron, principalmente, la agricultura de temporal (2.6%), el pastizal (0.4%) y la agricultura de riego (0.3%) del área estatal. La tasa de deforestación anual para San Luis Potosí fue de 0.14%.

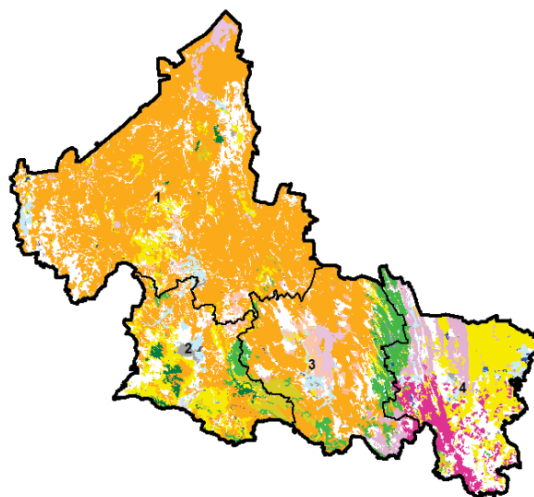


Fig. 2. Mapa de vegetación y uso del suelo (Serie II, 1993).

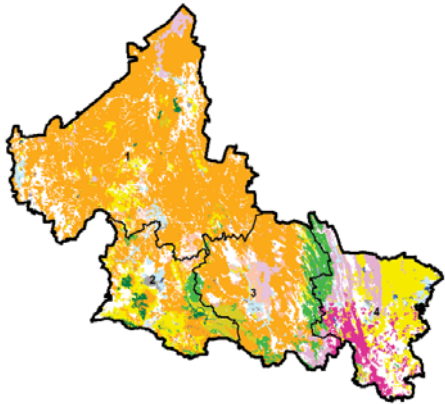


Fig. 2. Mapa de vegetación y uso del suelo (Serie II, 1993).

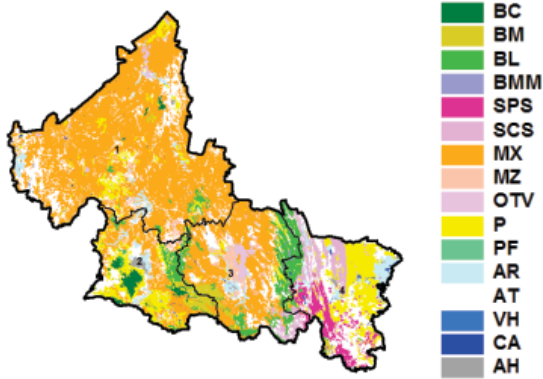


Fig. 3. Mapa de vegetación y uso del suelo (Serie IV, 2007).

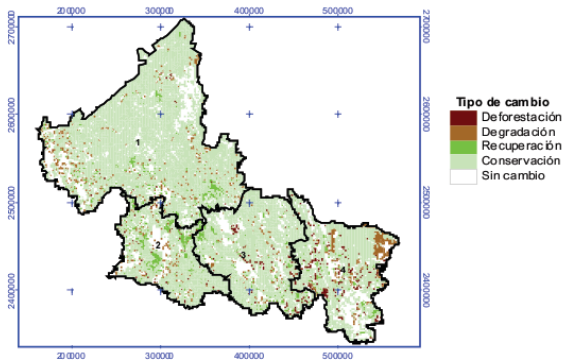


Fig. 4. Mapa de cambio de uso del suelo. 1. Altiplano, 2. Centro, 3. Media y 4. Huasteca.

La variación interanual de la vegetación asociada a los cambios en la precipitación fue monitoreada exitosamente, mediante la serie de tiempo de NDVI, obtenido el producto combinado sensor MODIS MCD43A4 para el periodo 2000-2010. La coherencia espacial de las condiciones de humedad para los años de análisis se observa claramente en los patrones de NDVI obtenidos para cada año. Los cambios en la serie de tiempo fueron capturados adecuadamente por el segundo componente principal. Se detectaron tanto los años secos como los años húmedos. El año más seco en la serie de tiempo fue 2000, con un NDVI máximo promedio de 0.45 y una precipitación total promedio de 497 mm. Mientras que el año más húmedo fue 2008, con un NDVI máximo promedio de 0.60, y una precipitación total promedio de 817 mm. Investigaciones posteriores permitirán averiguar los detalles de los cambios encontrados a una mayor escala espacial.

En la figuras 5 se observa el PC1 que captura 90.2% de la varianza total del conjunto de datos y describe los valores comunes de NDVI en todos los años de análisis. Esto se corrobora al observar altas cargas positivas que representan las correlaciones (mayores a 0.92), entre las imágenes anuales compuestas con el máximo NDVI contra el CP1; las tonalidades claras o valores más altos están directamente ligados a la densidad de la vegetación forestal, y se encuentran en las zonas boscosas del área de estudio, mientras que los valores con tonalidad más baja corresponden a lugares de clima árido, donde la vegetación predominante es matorral. En la figuras 6 se muestra el segundo componente principal (PC2), que recoge 1.8% de la varianza total de la serie temporal y es atribuible al cambio.

CONCLUSIONES

La dinámica de uso del suelo fue similar en las zonas biogeográficas Altiplano y Media de San Luis Poto-

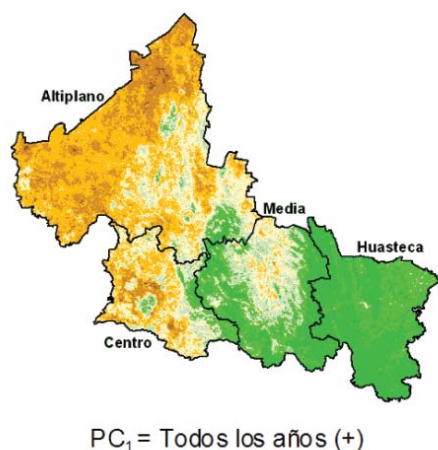


Fig. 5. Primer componente principal de la serie de tiempo 2000-2010.

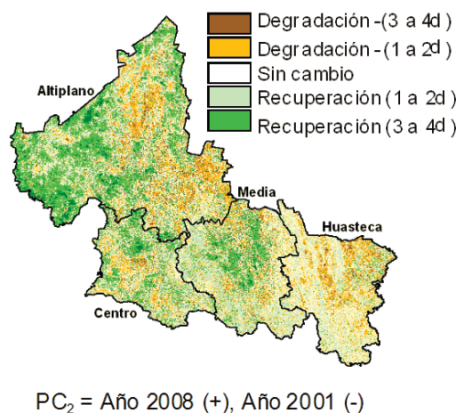


Fig. 6. Segundo componente principal de la serie de tiempo 2000-2010.

sí. La agricultura de temporal y el pastizal desplazaron al matorral, principalmente en los municipios de Villa Hidalgo, Moctezuma y Vanegas. La zona Centro, donde se encuentra la zona metropolitana de San Luis Potosí, registró una tasa de deforestación positiva (0.13%), es decir, recuperación. El matorral mejoró su densidad forestal y en la cartografía se mapeó como bosques de coníferas con vegetación secundaria, interpretándolo como una recuperación en los municipios de San Luis Potosí y Villa de Reyes, en la Sierra de San Miguelito y Armadillo de los Infante, en la Sierra de Álvarez. Para el caso de la zona Media, los municipios que registra-

ron una recuperación fueron San Nicolás Tolentino y Santa Catarina. La zona Huasteca fue la más afectada por la deforestación explicada en el cambio de selva perennifolia y subperennifolia a agricultura de temporal, en los municipios de Aquismón, Tamasopo, Tamuín y Ciudad Valles, entre otros. Aunque se registraron altos valores absolutos en deforestación, las tasas fueron relativamente bajas y probablemente tuvieron una influencia de los valores involucrados en su cálculo. Por ello, en estudios de este tipo se deben considerar diferentes índices de cambio para generar una idea más precisa de la dinámica de cambio en la zona de estudio. Esta investigación representa la línea base a nivel estatal, y plantea ser una fuente interesante de información sobre el monitoreo del cambio en los recursos forestales de la entidad durante 1993-2007.

Los resultados obtenidos de los datos espectrales MCD43A4 para estudios de monitoreo interanual e intraanual de la vegetación, a partir de 2000, confirman el potencial (lanzado a finales de 1999) a una escala espacial mejorada de 500 m. El NDVI obtenido del procesamiento del producto MODIS combinado MCD43A4 puede emplearse como método indirectamente para el monitoreo histórico de la precipitación, como información fuente para modelación hidrológica, e incluso en estudios de vulnerabilidad a incendios forestales, especialmente en aquellas regiones del mundo que no cuenten con una red de observatorios meteorológicos.

RESUMEN

Se realizó un análisis de cambio de uso del suelo, con énfasis en el proceso de deforestación, mediante técnicas de comparación cartográfica de las series II (1993) y IV (2007) de vegetación y uso del suelo en las cuatro zonas de San Luis Potosí: (1) Altiplano, (2) Centro, (3) Media y (4) Huasteca. Las matrices

de cambio se construyeron al comparar ambos mapas, los cuales fueron validados previamente mediante la construcción de matrices de confusión con sitios de campo del Inventario Forestal Nacional. Se calculó la tasa de deforestación anual para cada zona: Altiplano (-0.11%), Media (-0.16%), Centro (0.13%) y Huasteca (-0.51%). En las zonas áridas y semiáridas se detectó un cambio de matorral a pastizal, mientras que la selva fue la vegetación más afectada en la zona Huasteca. Las tasas de deforestación obtenidas fueron más bajas que las reportadas en la bibliografía para condiciones similares. Por otra parte, se analizaron los cambios interanuales en la vegetación con datos satelitales hipertemporales de resolución media en el estado de San Luis Potosí, México, y datos de precipitación. Se emplearon 489 imágenes del producto combinado MODIS MCD43A4 (500 m, resolución espacial), correspondientes al periodo 2000-2010 (once años). Se realizaron composites temporales anuales de índices de vegetación de diferencias normalizadas (NDVI), usando la técnica de máximo valor compuesto (MVC, por sus siglas en inglés); el análisis de la serie de tiempo anual se realizó mediante la técnica estadística multivariada de Análisis de Componentes Principales (PCA, por sus siglas en inglés), en el que la interpretación del segundo componente principal (PC, por sus siglas en inglés) recogió el detalle de los cambios observados. Se observó una relación altamente significativa ($p = 0.01$) entre el NDVI máximo anual y la precipitación anual; además de una tendencia ligeramente a la alza.

Palabra clave: Uso del suelo, Deforestación, Comparación cartográfica, San Luis Potosí, Vegetación.

ABSTRACT

A land use change analysis, focused on the deforestation process, was carried out by cartographic com-

parison of series II (1993) and IV (2007) of land use and land cover maps for four biogeographical zones of the state of San Luis Potosí: i) Altiplano, ii) Centro, iii) Media and iv) Huasteca. The change matrixes were constructed by comparing both maps, and were successfully validated with National Forest Inventory plots by using a confusion matrix. The annual deforestation rate was calculated by biogeographical zone: Altiplano (-0.11%), Media (-0.16%), Centro (0.13%) and Huasteca (-0.51%). A change from shrubland to grassland was more evident in arid and semiarid zones; meanwhile rainforest was the most affected vegetation in the Huasteca zone. Obtained deforestation rates are lower than the national average by vegetation and land use class. A hypertemporal dataset comprising 489 MODIS MCD43A4 imagery (500 m spatial resolution) taken over the last 10 years (2000-2010) were used. Ten temporary yearly composites were constructed from Normalized Difference Vegetation Indices (NDVI) using the Maximum Composite Value approach. The time series dataset was also comprised using the Principal Component Analysis technique, where the interpretation of the second principal component captured the main anomalies in maximum yearly NDVI values. A highly significant relationship was observed between maximum yearly NDVI and annual precipitation. A slightly upward NDVI trend was observed.

Keywords: Land use, Deforestation, Cartographic comparison. San Luis Potosi, Vegetation.

REFERENCIAS

1. Chuvieco, E. 2008. Earth Observation of Global Change. The Role of Satellite Remote Sensing in Monitoring the Global Environment. Ed. Springer. 228 p.
2. Lambin, E.F., B.L. Turner, H. Geist, S. B. Agbola, A. Angelsen, J., W. Bruce, O.T. Coomes, V. Dirzo, G. Fischer,

- C. Folke, P.S. George, K. Homewood, J. Imbernon, R. Leemans, X. Li, E.F. Moran, M. Mortimore, P.S. Ramakrishnan, J.F. Richards, H. Skanes, W. Steffen, G.D. Stone, U. Svedin, T.A. Veldkamp, C. Vogel, and J. Xu. 2001. The causes of land-use and landcover change: moving beyond the myths. *Global Environ. Change* 11: 261-269.
3. Aspinall, R.J. 2008. Basic and applied land use science. In: Aspinall, R.J. and Hill, M.J. *Land use change. Science, Policy and Management*. CRC Press. Taylor y Francis Group. ISBN:978-1-4200-4296-2.
 4. Alcántara-Ayala, I., Esteban-Chávez, O., and Parrot, J.F. 2006. Landsliding related to land-cover change: A diachronic analysis of hillslope instability distribution in the Sierra Norte, Puebla, Mexico. *Catena*. 65:152–165.
 5. Antonio-Némiga, X., Treviño-Garza, E.J., Jiménez-Pérez, J., Villalón-Mendoza, H. y Navar-Chaidez, J.J. 2006. “Cambios en la vegetación en la subcuenca del Río Pílon, Nuevo León, México”. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 12(1):5-11.
 6. Echeverría, C., Coomes, D.A., Hall, M. and Newton, A.C. 2008. Spatially explicit models to analyze forest loss and fragmentation between 1976 and 2020 in southern Chile. *Ecological Modelling*. 212:439-449.
 7. Ellis, E.A. and Poter-Bolland, L. 2008. Is community-based forest management more effective than protected areas? A comparison of land use/land cover change in two neighboring study areas of the Central Yucatan Peninsula, Mexico. *Forest Ecology and Management*. 256:1971-1983.
 8. Calvo-Alvarado, J., McLennan, B., Sánchez-Azofeita, A., and Garvin, T. 2009. Deforestation and forest restoration in Guanacaste, Costa Rica: Putting conservation policies in context. *Forest Ecology and Management*. 258:931-940.
 9. Deng, J.S., Wang, K., Hong, Y. and Qi, J.G. 2009. Spatio-temporal dynamics and evolution of land use change and landscape pattern in response to rapid urbanization. *Landscape and Urban Planning*. 92:187-198.
 10. Sirén, A. H. and Brondizio, E.S. 2009. Detecting subtle land use change in tropical forests. *Applied Geography*, 29:201-211.
 11. Chen, J., Avise, J., Guenther, A., Wiedinmyer, C., Salathe, E., Jackson, R.B. and Lamb, B. 2009. Future land use and land cover influences on regional biogenic emissions and air quality in the United States. *Atmospheric Environment*. 43:5771-5780.
 12. Chowdhury, R.R. 2006. Landscape change in the Calakmul Biosphere Reserve, Mexico: Modeling the driving forces of smallholder deforestation in land parcels. *Applied Geography*. 26:129-152.
 13. Bhattarai, K., Conway, D. and Yousef, M. 2009. Determinants of deforestation in Nepal’s Central Development Region. *Journal of Environmental Management*. 91:471-488.
 14. Biggs, T.W., Atkinson, E., Powell, R. and Ojeda-Revah, L. 2010. Land cover following rapid urbanization on the US–Mexico border: Implications for conceptual models of urban watershed processes. *Landscape and Urban Planning*. 96:78-87.
 15. Alcántara-Ayala, I., Esteban-Chávez, O., and Parrot, J.F. 2006. Landsliding related to land-cover change: A diachronic analysis of hillslope instability distribution in the Sierra Norte, Puebla, Mexico. *Catena*. 65:152–165.
 16. Angelsen, A. and Kaimowitz, D. 2001. *Agricultural Technologies and Tropical Deforestation*. In: *Introduction: The Role of Agricultural Technologies in tropical Deforestation*. Ed. CABI Publishing and Center for International Forestry Research. ISBN: 0-85199-451-2.422p.
 17. Culas, R.J. 2007. Deforestation and the environmental Kuznets curve: An institutional perspective. *Ecological Economics*. 61:429-437.
 18. FAO, 2005. *Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales 2005. Hacia la ordenación forestal sostenible*. Ed. Estudio FAO Montes, 147. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia. 320 p. Disponible en www.fao.org/forestry/site/ fra2005/es.
 19. Gane, M. 2007. *Forest Strategy. Strategic Management and Sustainable Development for the Forest Sector*. Ed. Springer. ISBN: 978-1-4020-5965-0. 414p.

20. Schreuder, Y. 2009. The Corporate Greenhouse Climate Change Policy in a Globalizing World. In: Trade liberalization, economic development and the environment. ISBN:978 1-84277-958-3-PB, pp 92-96.
21. Angelsen, A. and Kaimowitz, D. 2001. Agricultural Technologies and Tropical Deforestation. Ed. CABI Publishing. ISBN:0-85199451-2. 422p.
22. Mayaux, P., Eva, H., Brink, A., Achard, F. and Belward, A. 2008. Remote sensing of land-cover and land-use dynamics. In: Chuvieco, E. Earth Observation of Global Change. The Role of Satellite Remote Sensing in Monitoring the Global Environment. Ed. Springer. pp. 85-108p.
23. Eakin, H. and Bojórquez-Tapia, L.A. 2008. Insights into the composition of household vulnerability from multicriteria decision analysis. *Global Environmental Change*. 18:112-127.
24. IPCC 2006. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Eggleston, S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T. and Tanabe, K. Vol. 1-5:1998 p.
25. Newton, A.C. 2007. Forest Ecology and Conservation. A Handbook of Techniques. Ed. Oxford University Press. 454 p.
26. Gomarasca, M.A. 2009. Basics of Geomatics. Ed. Springer. ISBN: 978-1-4020-9013-4. pp. 257-340. 656 p.
27. IPCC 2003. Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. Penman, J., Gytarsky, M., Hiraishi, T., Krug, T., Kruger, D., Pipatti, R., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, K. and Wagner. Ed. Institute for Global environmental strategies (IGES). Japan. ISBN:4-88788-003-0. 596 p.
28. Macedo-Cruz, A., Pajares-Martinsanz, G. and Santos-Peñas, M. 2010. Clasificación no supervisada con imágenes a color de cobertura terrestre. *Agrociencia* 44:711-722.
29. Van Oort, P.A.J. 2007 Interpreting the change detection error matrix. *Remote Sensing of Environment*. 108:1-8.
30. Fernández, D.S. and Lutz, M.A. 2010. Urban flood hazard zoning in Tucumán Province, Argentina, using GIS and multicriteria decision analysis. *Engineering Geology*. 111:90-98.
31. Santé-Riviera, I., Crecente-Maseda, R., Miranda-Barrós, D. 2008. GIS-based planning support system for rural land-use allocation. *Computers and Electronics in Agriculture*. 63:257-273.
32. Beverly, J.L., Herd, E.P.K. and Ross, C.J.C. 2009. Modeling fire susceptibility in west central Alberta, Canada. *Forest Ecology and Management*. 258:1465-1478.
33. Aversa-Valente, R.O. and Vettorazzi, C.A. 2008. Definition of priority areas for forest conservation through the ordered weighted averaging method. *Forest Ecology and Management*. 256:1408-1417.
34. Boroushaki, S. and Malczewski, J. 2010. Using the fuzzy majority approach for GIS-based multicriteria group decision-making. *Computers y Geosciences*. 36:302-312.
35. Bello-Dambatta, A., Farmani, R., Javadi, A.A. and Evans, B.M. 2009. The Analytical Hierarchy Process for contaminated land management. *Advanced Engineering Informatics*. 23:433-441.
36. Velázquez, A., Mas, J.F., Díaz-Gallegos, J.R., Mayorga-Saucedo, R., Alcántara, P.C., Castro, R., Fernández, T., Bocco, G., Ezcurra, E., y Palacio, J.L. 2002. Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México. *Gaceta Ecológica, Instituto Nacional de Ecología*. 62:21-37.

Recibido: 1 de agosto de 2013

Aceptado: 9 de septiembre de 2013