



# Cambios de cobertura/uso del suelo en una porción de la Zona de Transición Mexicana de Montaña

## Coverage/land use changes in a portion of the Mountainous Mexican Transition Zone

José Manuel Camacho-Sanabria<sup>1,\*</sup>, José Isabel Juan Pérez<sup>2</sup>, Noel Bonfilio Pineda Jaimes<sup>3</sup>,  
Edel Gilberto Cadena Vargas<sup>3</sup>, Luis Carlos Bravo Peña<sup>4</sup> y Marcela Sánchez López<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Posgrado en Ciencias Ambientales, Facultad de Química, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México.

<sup>2</sup> Instituto de Estudios sobre la Universidad, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México. jupi582602@gmail.com

<sup>3</sup> Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México. nbpinedaj@uaemex.mx; edelcadena@yahoo.com.mx

<sup>4</sup> Unidad Multidisciplinaria Cuauhtémoc, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Chihuahua, México. lcbravop@gmail.com

<sup>5</sup> Centro de Enseñanza de Lenguas (CELe), Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México. marce\_sl@yahoo.com

\* Autor de correspondencia. jmanuelcs@live.com.mx

### RESUMEN

La Porción Surponiente del Estado de México (PSEM) se ubica en la Zona de Transición Mexicana de Montaña. Las comunidades forestales que predominan en este territorio son bosques de pino (*Pinus* spp.), encino (*Quercus* spp.), mixtos (*Pinus* spp. - *Quercus* spp. y *Quercus* spp. - *Pinus* spp.), mesófilo de montaña y tropical caducifolio, los cuales están siendo modificados por la influencia de procesos antropogénicos. Este estudio presenta el análisis de los cambios de cobertura y uso del suelo ocurridos entre 1989 y 2009 en la PSEM, a través de la interpretación de imágenes de satélite (Landsat TM), que en complemento con la aplicación del algoritmo máxima verosimilitud permitieron la construcción de mapas temáticos de uso de suelo y vegetación, los cuales fueron evaluados para conocer su confiabilidad temática. A partir de la sobreposición de estos mapas se elaboró una matriz de cambios que comprende la superficie de las coberturas y usos del suelo para cada año y con base en esta se determinaron las tasas de cambio. Los resultados obtenidos demuestran que la cobertura del bosque disminuyó considerablemente, es decir, se eliminaron 19 262 ha, las cuales fueron ocupadas por las categorías cuerpos de agua (105 ha), agropecuario (19 113 ha), asentamientos humanos (39 ha) y agricultura tecnificada controlada (5 ha). La superficie deforestada es resultado del establecimiento y la práctica de actividades relacionadas con la agricultura y ganadería.

**PALABRAS CLAVE:** categorías, evaluación de la confiabilidad temática, clasificación supervisada, matriz de cambios, tasas de cambio.

### ABSTRACT

The Southwest region of the State of Mexico (PSEM as it stands in Spanish) is located in the so called Mexican Transition Mountainous Zone. The forest communities that prevail in this area are pine trees forests (*Pinus* spp.), oak trees forests (*Quercus* spp.), mixed ones, mountainous cloud forest and tropical deciduous forest, which are being modified due to the influence of human processes. This research paper establishes a methodology to analyze the changes on the land cover of the PSEM which took place from 1989 to 2009 using a technique of image satellite interpretation (Landsat TM), as well as the use of the maximum authenticity algorithm which leads towards the implementation of soil and vegetation maps whose main purpose is to obtain information on the validity of these study cases. Overlapping those maps, it is possible to come up with a matrix of changes to check annual modifications on the land cover, and based on it the changes rates can be measured. From data obtained through this research, it can be stated that the land cover of this forest has considerably decreased because 19 262 ha disappeared and were taken up by water supplies (105 ha), farming lands (19 113 ha), human settlements (39 ha) and technical and controlled agriculture (5 ha). It can be summed up that this deforestation mainly comes as a result of the practice of agriculture and livestock activities indeed.

**KEY WORDS:** category, evaluation of theme reliability, supervised classification, matrix of changes, changes rates.

## INTRODUCCIÓN

La Zona de Transición Mexicana de Montaña (Halfpter, 1978), o bien, Región Mesoamericana de Montaña (Rzedowski, 1978), es el territorio en donde convergen y, en cierta forma, establecen relaciones intraespecíficas e interespecíficas diversas especies vegetales y animales, características de las regiones biogeográficas Neártica (Norteamérica) y Neotropical (América del Sur, América Central y América Insular). Se trata de una de las biotas más ricas en especies y endemismos; concebida como “bosques Mesoamericanos”, es el segundo centro de diversidad florística más importante, con 9000 especies de plantas endémicas (Myers, 1998).

La Porción Surponiente del Estado de México (PSEM) forma parte de la Zona de Transición Mexicana de Montaña, en esta coexisten una amplia diversidad de ecosistemas terrestres, predominan los bosques templados de coníferas, encinos, mixtos, mesófilo de montaña y el bosque tropical caducifolio o selva baja caducifolia. Estos ecosistemas de bosque se caracterizan por contar con una notable biodiversidad (Flores-Villela y Gerez, 1994; Challenger, 1998) y por brindar servicios ambientales necesarios para el bienestar de las poblaciones (Chapa-Bezanilla *et al.*, 2008).

Dentro de las principales causas que amenazan los bosques de la PSEM destacan, la presión antropogénica sobre los recursos forestales (tala clandestina o extracción de madera para la elaboración de productos maderables y no maderables), la práctica de actividades como la roza, tumba y quema, y la apertura de nuevos espacios para el establecimiento de cultivos en sistemas de lomeríos. Esto ha ocasionado un desequilibrio ambiental, poniendo en peligro la supervivencia de las poblaciones animales y vegetales que habitan este patrimonio ecológico. Sin embargo, los procesos asociados con la dinámica de los cambios ocurridos en la cobertura vegetal y uso del suelo, es uno de los principales factores que determina la permanencia, disminución y extinción de los ecosistemas de bosque en la PSEM.

Los estudios de cambio de uso de suelo y vegetación son el referente para conocer las trayectorias de distin-

tos procesos asociados con la deforestación, degradación y perturbación de los bosques, erosión y desertificación del suelo, pérdida de la biodiversidad (Lambin *et al.*, 2001), entre otros. Estos procesos de transformación o cambio que experimentan las coberturas vegetales y usos del suelo de un determinado territorio o región, son considerados en muchos países como una de las principales causas que coadyuvan al deterioro ambiental, por ello están ubicados en el centro de la investigación ambiental (Nájera *et al.*, 2010). Es evidente que, durante las últimas décadas, las actividades antrópicas se han convertido en el principal desencadenador de las transformaciones de los ecosistemas terrestres, por encima de los fenómenos naturales (Vitousek *et al.*, 1997).

El desarrollo de investigaciones asociadas con los cambios ocurridos en las cubiertas terrestres y usos del suelo de un determinado espacio geográfico y en una dimensión temporal, requiere, principalmente, del uso y manipulación de distintos insumos cartográficos, sobre todo, de mapas de uso de suelo y vegetación, pues es a partir de estos que los especialistas en el área, así como las autoridades responsables del uso y manejo de los recursos naturales, establecen e implementan políticas orientadas al aprovechamiento y conservación de estos (Millington y Alexander, 2000).

Durante décadas, los materiales cartográficos, principalmente, los mapas de uso de suelo y vegetación se adquirían en formato análogo (papel). Actualmente, estos insumos cartográficos se encuentran disponibles en internet (Mas y Couturier, 2011), para su posterior uso y manejo en un Sistema de Información Geográfica. Estas herramientas permiten identificar y representar espacialmente las áreas más susceptibles a cambiar. Además, ayudan a comprender los procesos y la dinámica de cambio que experimentan las distintas coberturas terrestres y usos del suelo de un territorio en específico. En ocasiones, se utilizan para el desarrollo de modelos de cambios de uso de suelo y vegetación sustentados en el diseño y construcción de diferentes escenarios hipotéticos (Veldkamp y Lambin, 2001; Xiang y Clarke, 2003).



Actualmente, los especialistas que estudian las transformaciones ocurridas en los distintos paisajes naturales y antrópicos (culturales) de la superficie terrestre, utilizan, con frecuencia, mapas de uso de suelo y vegetación derivados de la interpretación visual de imágenes de satélite, estas pueden ser de mediana o alta resolución espacial. Es a partir de estos insumos cartográficos que se puede identificar, describir, cuantificar, localizar, analizar, evaluar, explicar y modelar la dinámica y los procesos de cambio que acontecen en las diversas comunidades vegetales y usos del suelo de un espacio geográfico en particular.

Durante décadas, en México, el desarrollo de investigaciones de cambio de uso del suelo y vegetación se sustentó en el uso de materiales cartográficos relacionados con las distintas coberturas y usos del suelo del territorio nacional. El manejo, análisis e interpretación de los datos derivados de estos insumos cartográficos (tasas de cambio, pérdidas, ganancias, cambio neto, cambio total, intercambios, índices de persistencia), ha generado un cierto grado de incertidumbre o inquietud en la comunidad científica, principalmente, en los especialistas que realizan estudios asociados con la temática, pues, en ocasiones, en el contenido de estos trabajos se hallan implícitos el diseño e implementación de estrategias orientadas al cuidado, conservación, manejo y uso de los recursos naturales. La preocupación por utilizar estos materiales radica en la calidad de los insumos cartográficos, la metodología utilizada para su elaboración y la falta de aplicación de métodos que validaran su fiabilidad (Mas *et al.*, 2003; Mas y Couturier, 2011).

Con base en lo anterior, es recomendable y, hasta cierto punto necesario, que los mapas de uso de suelo y vegetación (producto de la interpretación de imágenes de satélite o fotografías aéreas) se sometan a procesos relacionados con la evaluación de la confiabilidad temática (Mas *et al.*, 2003). Se debe considerar que, actualmente, estos insumos cartográficos se utilizan, con frecuencia, para el diseño y construcción de modelos y escenarios asociados con los cambios de cobertura y uso del suelo, siendo estos el referente para el desarrollo de políticas que coadyuvan al cuidado, preservación y restauración los recursos naturales.

La evaluación de la confiabilidad temática de mapas de uso de suelo y vegetación, o bien, de imágenes de satélite clasificadas, es un tema que está cobrando mucho interés, sobre todo, en investigadores especialistas en la elaboración de estudios de cambios de cobertura vegetal y uso del suelo (Cortina *et al.*, 1998; Buendía *et al.*, 2002; Velázquez *et al.*, 2002; Mas *et al.*, 2003; Antonio *et al.*, 2006; Franco *et al.*, 2006a; Valdez *et al.*, 2011; Champo *et al.*, 2012). Determinar la confiabilidad de un producto cartográfico, especialmente la de los mapas de uso de suelo y vegetación, permite a los usuarios valorar su ajuste con la realidad y, así, asumir el riesgo de tomar decisiones con base en esta información cartográfica. Además, contribuye a conocer y modelar el error que resulte de la sobreposición de varias capas con cierto grado de error en un SIG (Walsh *et al.*, 1987; Luneta *et al.*, 1991; Goodchild *et al.*, 1992; Burrough, 1994).

En el caso particular del Estado de México, pese a la existencia de estudios relacionados con los cambios de cobertura terrestre, ocupación o uso del suelo y procesos de deforestación en este territorio (Villers *et al.*, 1998; Pineda *et al.*, 2008; Pineda *et al.*, 2009; Pineda, 2010; Camacho *et al.*, 2011; García *et al.*, 2012; Zepeda *et al.*, 2012; Juan, 2013), son mínimas las investigaciones (Franco *et al.*, 2006a; Franco *et al.*, 2006b; Franco *et al.*, 2006c) en las cuales los insumos cartográficos que se utilizaron para la elaboración de estas, fueron sometidos al proceso de evaluación de confiabilidad temática. El presente estudio analiza los cambios de cobertura y uso del suelo, ocurridos en un período de 20 años en la PSEM. Este análisis se sustenta en la interpretación de imágenes de satélite Landsat TM de los años 1989 y 2009, la sobreposición de mapas de uso de suelo y vegetación y la aplicación de métodos y técnicas estadísticas.

## OBJETIVO

Analizar los cambios de cobertura y uso del suelo ocurridos entre 1989 y 2009 en la Porción Surponiente del Estado de México, a través de mapas de uso de suelo y vegetación, producto de la interpretación de imágenes de satélite (Landsat TM) y la aplicación del algoritmo máxima verosimilitud, para conocer y comprender la dinámica y

los procesos de cambio de las coberturas y usos del suelo que caracterizan a este territorio.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

La PSEM se ubica en la parte central del territorio de la República Mexicana, entre los paralelos  $18^{\circ} 59' 19''$  y  $19^{\circ} 24' 00''$ , y los meridianos  $99^{\circ} 50' 33''$  y  $100^{\circ} 24' 36''$ . Desde el punto de vista político – administrativo, la porción está integrada por los municipios de Amanalco de Becerra, Donato Guerra, Ixtapan del Oro, Otzoloapan, Santo Tomás de los Plátanos, Temascaltepec, Valle de Bravo y Zacazonapan (Fig. 1). Tiene una superficie territorial de  $1787.58 \text{ km}^2$ , conformada por una amplia diversidad de ambientes naturales y socioculturales, estos últimos

con diferentes densidades demográficas (Juan *et al.*, 2010). Su población total es de 175 447 habitantes (Inegi, 2010); la mayor parte de estos se dedican a actividades relacionadas con el establecimiento, desarrollo y producción de sistemas agrícolas de temporal. La presencia de industrias en este territorio no es significativa; sin embargo, algunos habitantes practican actividades relacionadas con la industria minera y la transformación de materias primas (madera y piedra natural), principalmente, en el municipio de Zacazonapan y Amanalco de Becerra, respectivamente. Los servicios y el comercio se concentran en las cabeceras municipales que comprenden la porción.

### Materiales

Los materiales utilizados para la elaboración de los mapas de cobertura vegetal y uso del suelo de los años 1989 y

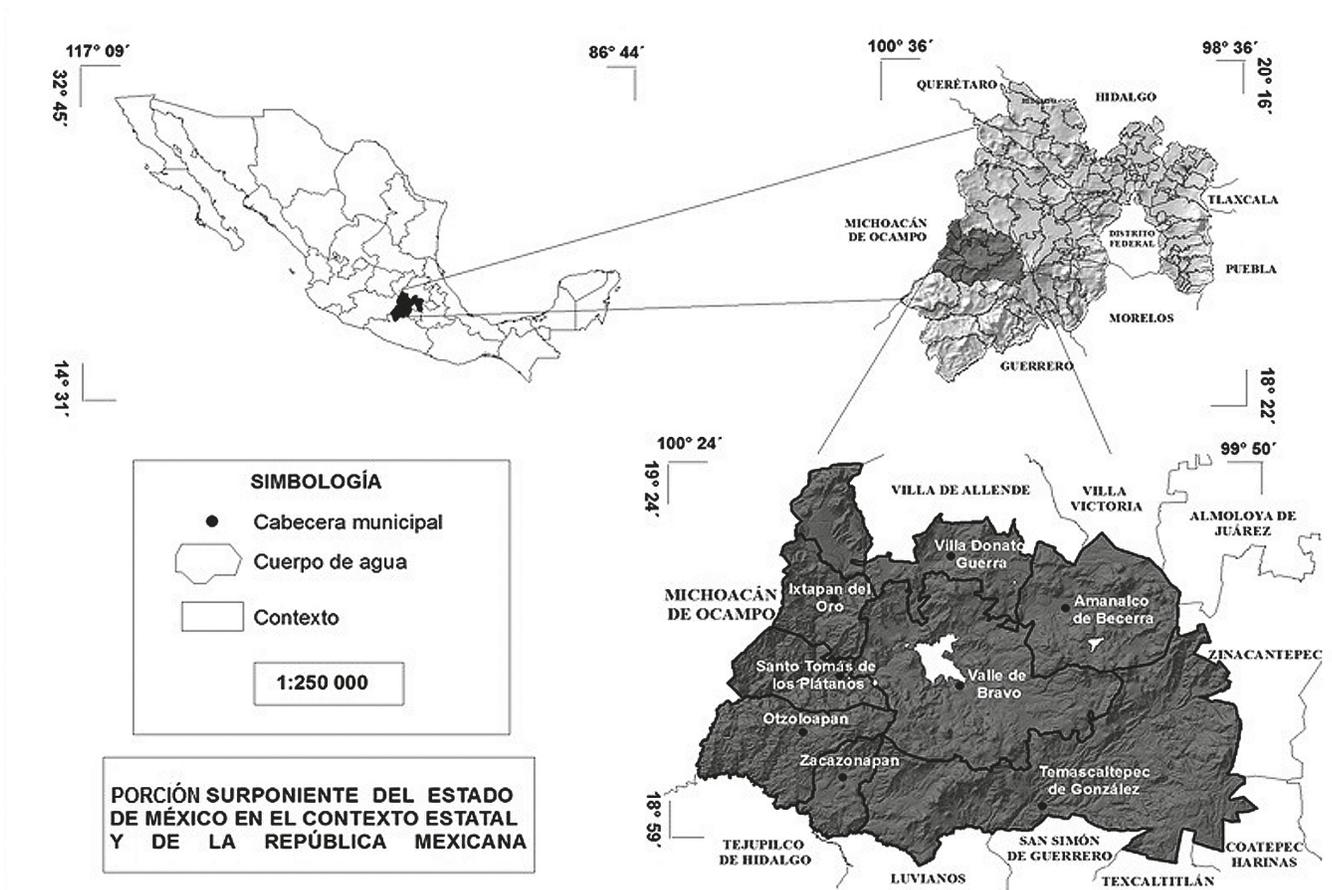


FIGURA 1. Ubicación geográfica de la Porción Surponiente del Estado de México

Fuente: Elaboración propia con base en Inegi (2009).



2009, fueron las imágenes de satélite del sensor Landsat Thematic Mapper (TM) de la época seca-fría, correspondientes a las fechas: 27 de diciembre de 1989 y 24 de noviembre de 2009. Ambas imágenes corresponden al *path 27* y *row 47*.

## Obtención de los mapas de cobertura vegetal y uso del suelo

### Unidades de análisis

Las clases o categorías de análisis utilizadas en la clasificación de las imágenes de satélite se determinaron, principalmente, en función de: a) la problemática a estudiar: disminución o pérdida de la cobertura forestal, resultado de la sustitución o reemplazo de otras coberturas vegetales y usos del suelo; b) los recorridos en campo (observación directa) y c) las posibilidades de discriminación que tiene el productor, respecto de las coberturas y usos del suelo durante el proceso de interpretación de las imágenes. Estas categorías o clases de análisis corresponden a Bosque (Bs), Cuerpos de agua (Ca), Agropecuario (Agp), Asentamientos humanos (Ah) y Agricultura tecnificada controlada [invernaderos] (Atc).

### Preprocesamiento o preclasificación

Esta fase metodológica comprendió la aplicación de procesos relacionados con la corrección radiométrica y corrección atmosférica, para ajustar y mejorar los valores radiométricos y la calidad de las imágenes de satélite. A partir de la combinación de las bandas TM4 (infrarrojo cercano), TM3 (visible rojo) y TM2 (visible verde), fue posible identificar e interpretar las categorías de análisis, y sobre esta se digitalizaron 70 campos o áreas de entrenamiento (número de píxeles representativos o prototipo de cada clase o categoría). La localización y distribución espacial de los campos de entrenamiento se realizó de forma aleatoria y homogénea (mínimo 10 campos para cada una de las categorías), y a través de recorridos de campo *in situ*, en complemento con el uso y manejo de un sistema de geoposicionamiento global (GPS).

La delimitación de las áreas de entrenamiento (número total de píxeles) se llevó a cabo con base en la

regla general de Jensen (1996), que consistió en considerar, al menos, 10 veces el número de bandas utilizadas en la elaboración de las estadísticas o parámetros de clasificación. Para calibrar el clasificador se utilizaron los píxeles prototipo de cada categoría (áreas de entrenamiento) y, posteriormente, estos se representaron gráficamente a través de histogramas, obteniendo como resultado firmas espectrales correspondientes a cada categoría. Estas se sometieron a un análisis de separabilidad (García y Mas, 2008), sustentado en la aplicación del método de divergencia transformada (DT), dado que este es el más utilizado en estudios donde se aplica el algoritmo máxima verosimilitud (Maussel *et al.*, 1990), como es el caso de este trabajo.

### Clasificación

Se realizó la clasificación supervisada de imágenes de satélite con base en la aplicación del algoritmo máxima verosimilitud, o también conocido como máxima probabilidad. Este algoritmo considera los parámetros de clasificación previamente calculados (clasificador calibrado) para etiquetar cada píxel de la imagen en una de las clases definidas (Lira, 2010). A partir de la aplicación de este algoritmo se generaron los mapas de uso de suelo y vegetación de los años 1989 y 2009 de la PSEM. Los métodos, técnicas y procedimientos descritos en estas fases metodológicas (*preclasificación* y *clasificación*) fueron implementados en la herramienta Idrisi Selva.

## Validación de los mapas de cobertura vegetal y uso del suelo: 1989 y 2009

Para conocer el grado de certeza de los datos correspondientes a los mapas de uso de suelo y vegetación de los años 1989 y 2009 de la PSEM, estos se sometieron al proceso de evaluación de la confiabilidad temática (Mas *et al.*, 2003). Este proceso se realizó a partir de las siguientes fases metodológicas:

1. *Diseño del muestreo*. Esta fase consistió en determinar las unidades de muestreo (píxel), el método de

selección o muestreo (aleatorio estratificado<sup>1</sup>) y el número de unidades de muestreo o tamaño de la muestra. Este último se determinó con base en Congalton (1988 y 1991), que sugiere verificar, por lo menos, 50 puntos por categoría. Este principio se aplicó a ambas imágenes clasificadas (1989 y 2009). Como en la primera imagen se definieron cuatro categorías o clases de análisis, fue necesario verificar 200 puntos de muestreo. Para el caso de la segunda, fue preciso muestrear 250 sitios de verificación, debido a que en este año (2009) se incluyó la categoría Agricultura tecnificada controlada.

2. *Evaluación de sitios de verificación.* El registro de los puntos de muestreo se realizó *in situ*, es decir, la localización espacial (coordenadas UTM: Datum WGS84) de los sitios de verificación se llevó a cabo mediante de los recorridos de campo (observación directa), y con el uso y manejo de un navegador GPS (Sistema de Posicionamiento Global). Los puntos de muestreo se sobrepusieron en la cartografía de uso de suelo y vegetación (1989 y 2009), producto de la interpretación visual de las imágenes de satélite, para asociarlos con las categorías o clases que se definieron en cada uno de los mapas clasificados. Esta fase se complementó con el uso de imágenes de satélite de alta resolución espacial.
3. *Análisis de los datos.* Esta fase se sustentó en el desarrollo de una matriz de confusión o matriz de error. Se trata de una matriz bidimensional, en donde generalmente las filas representan las clases de referencia (verdad terreno) y las columnas las categorías del mapa (verdad imagen), deducidas de la interpretación de imágenes de satélite, lógicamente ambas tendrán el mismo número y significado. La diagonal de la matriz expresa el número de puntos de verificación para los cuales existe una correspondencia entre las categorías del mapa clasificado y los datos de referencia, mientras los marginales indican errores de asignación

(USDA, 1995; Stehman y Czaplewski, 1998; Mas *et al.*, 2003; Franco *et al.*, 2006a) (Tabla 1).

TABLA 1. Matriz de confusión o matriz de error.

		Verdad imagen (Categorías del mapa = j)				Total
		$j_1$	$j_2$	...	$j_q$	
Verdad terreno (Clases de referencia= i)	$i_1$	$i_1j_1$	$i_1j_2$	...	$i_1j_q$	$i_{1+}$
	$i_2$	$i_2j_1$	$i_2j_2$	...	$i_2j_q$	$i_{2+}$
	...	...	...	...	...	...
	$i_q$	$i_qj_1$	$i_qj_2$	...	$i_qj_q$	$i_{q+}$
Total		$+j_1$	$+j_2$	...	$+j_q$	$\Sigma+j_{i+}$

Nota: a)  $ij$  = número de píxeles (superficie) correctamente clasificados de cada categoría o clase; b)  $i_{i+}$  = es la suma de los píxeles (superficie) correspondientes a la clase de referencia  $i$ ; c)  $+j_i$  = corresponde a la suma de los píxeles (superficie) de la categoría del mapa  $j_i$ ; d)  $\Sigma+j_{i+}$  = es el total de la suma de los píxeles de las clases de referencia ( $\Sigma+i$ ), o bien, el total de la suma de los píxeles correspondientes a las categorías del mapa ( $\Sigma+j$ ). También, este dato corresponde al número total de puntos o sitios (píxeles) muestreados.

Se construyeron dos matrices de confusión, una para cada año (1989 y 2009) y, a partir de los datos que comprenden a cada una de estas se determinaron los índices de confiabilidad (Stehman y Czaplewski, 1998) [Tabla 3]. Previo al cálculo de estos índices, fue necesario realizar un ajuste (corrección) a las matrices de confusión, dado que el método de muestreo utilizado en el presente estudio corresponde al aleatorio estratificado, es decir, el número de sitios de muestreo por categoría no es proporcional a la superficie de cada una de estas y los coeficientes obtenidos no deben interpretarse de esta manera (Mas *et al.*, 2003).

El ajuste, o bien, las correcciones necesarias a las cuales se sometieron las matrices de confusión se realizó a partir del método propuesto por Card (1982) que, de manera general, consistió en ponderar el número de sitios de verificación en relación a la superficie de cada categoría representada en el mapa. Esto fue posible mediante la construcción de matrices de confusión expresadas en proporción (Tabla 2). También, con este método se determinaron los intervalos de confianza

<sup>1</sup> La estratificación se realizó a partir de las categorías de análisis, esto con el propósito de distribuir el esfuerzo de muestreo y garantizar que no se sobre-muestreen las categorías con mayor superficie en relación a las de menor superficie (Card, 1982).



TABLA 2. Matriz de confusión expresada en proporción.

Verdad terreno (Clases de referencia= i)	Verdad imagen (Categorías del mapa = j)				Total
	$j_1$	$j_2$	...	$j_q$	
$i_1$	$P_{i_1j_1}$	$P_{i_1j_2}$	...	$P_{i_1j_q}$	$P_{i_1+}$
$i_2$	$P_{i_2j_1}$	$P_{i_2j_2}$	...	$P_{i_2j_q}$	$P_{i_2+}$
...	...	...	...	...	...
$i_q$	$P_{i_qj_1}$	$P_{i_qj_2}$	...	$P_{i_qj_q}$	$P_{i_q+}$
Total	$P_{+j_1}$	$P_{+j_2}$	...	$P_{+j_q}$	$\Sigma P_{+j}$ $P_{i+}$

Nota: a)  $P_{ij}$  = proporción de píxeles (superficie) correctamente clasificados de cada categoría o clase; b)  $P_{i+}$  = es la suma de las proporciones de los píxeles (superficie) correspondientes a la clase de referencia  $i$ ; c)  $P_{+j}$  = corresponde a la suma de las proporciones de los píxeles (superficie) de la categoría del mapa  $j$ ; d)  $\Sigma P_{+j}$  o  $P_{i+}$  = es el total de la suma de las proporciones de los píxeles de las clases de referencia ( $\Sigma P_{+j}$ ), o bien, el total de la suma de las proporciones de los píxeles correspondientes a las categorías del mapa ( $\Sigma P_{+j}$ ).

correspondientes a la confiabilidad global<sup>2</sup>, confiabilidad del usuario y confiabilidad del productor.

Una vez realizadas las correcciones a dichas matrices se procedió a calcular la proporción y área de cada una de las categorías o clases de análisis. Esto a partir de lo establecido por Mas y Couturier (2011) “la superficie corregida de una categoría es igual a la proporción de esta categoría que está correctamente cartografiada a la cual se le agrega la proporción de las demás categorías que en realidad pertenece a la categoría considerada”.

### Matriz de cambios: Período 1989-2009

El análisis temporal (20 años) de la dinámica de los cambios ocurridos en las coberturas vegetales y usos del suelo

2 El intervalo de confianza de la confiabilidad global se determinó con base en el tamaño de la muestra (200 sitios de verificación para el primer año y 250 para el segundo) y considerando una fiabilidad estimada de 80%.

TABLA 3. Ecuaciones para determinar los índices de confiabilidad.

Indicador	Expresión matemática	Descripción
Confiabilidad global o exactitud general	$P_c = (\Sigma P_{ij} / \Sigma P_{+j} \text{ o } P_{i+}) * 100$	Es la proporción de píxeles (superficie) correctamente clasificados en los mapas, producto de la interpretación de imágenes de satélite. El coeficiente derivado de su cálculo representa la probabilidad para cualquier sitio en el mapa de ser correctamente clasificado.
Medio – intervalo de confianza	$B = z_{\alpha/2} \sqrt{p(1-p)} / n$	Corresponde al error de la estimación precisa de la fiabilidad del mapa. Donde: $z_{\alpha/2}$ es el valor que separa a un área de $\alpha/2$ en la cola del lado derecho de la distribución normal estándar (el valor de $z_{\alpha/2}$ en este estudio corresponde a 1.96); $p$ es la fiabilidad esperada y; $n$ corresponde al tamaño de la muestra.
Error de comisión	$E_c = (1 - (P_{ij} / P_{+j})) * 100$	Indica la proporción de sitios de verificación cartografiada en una cierta clase $j$ , pero que en realidad pertenecen a otra categoría.
Error de omisión	$(E_o) = (1 - (P_{ij} / P_{i+})) * 100$	Representa la proporción de sitios de verificación correspondientes a una categoría $j$ que fue cartografiada en otra.
Confiabilidad del usuario	$C_u = (P_{ij} / P_{+j}) * 100$	Se interpreta como la probabilidad que un sitio clasificado como $j$ y aleatoriamente seleccionado sea realmente $j$ en el terreno.
Confiabilidad del productor	$C_p = (P_{ij} / P_{i+}) * 100$	Es la proporción de sitios de verificación de la clase $j$ que están representados en el mapa o en la base de datos como tal.

Fuente: Elaboración propia con base en Aronoff (1982); Chuvieco (1996); Stehman y Czaplewski (1998); Mas et al. (2003); Mas y Couturier (2011).

de la PSEM, se llevó a cabo mediante la sobreposición de mapas temáticos (uso de suelo y vegetación) y la construcción de una tabla bidimensional (tabulación cruzada) o matriz de cambios. Esta última se elaboró en la herramienta Idrisi Selva, con base en los datos correspondientes a los mapas de uso de suelo y vegetación de la fecha 1 (1989) y fecha 2 (2009). Las columnas de la matriz representan la proporción (área) de las categorías de la fecha 1 ( $f_1$ ), mientras que las filas contienen la proporción (superficie) de las categorías de la fecha 2 ( $f_2$ ). La diagonal principal representa la persistencia (en formato de negritas) de cada una de las categorías, o bien, la proporción (área) de cada categoría que se conservó entre la  $f_1$  y  $f_2$  (Tabla 4).

#### Tasas de cambio: Período 1989-2009

Con base en los datos derivados de la matriz de cambios (superficie de cada categoría) fue posible obtener las tasas de cambio de cada cobertura y uso del suelo para el período de análisis: 1989-2009. También, se consideró la superficie corregida de cada una de las categorías de análisis, producto del ajuste de los errores de clasificación (aplicación del método de Card), para el cálculo de las mismas. Las tasas de cambio se determinaron a partir de la siguiente ecuación (FAO, 1996):

$$t = 1 - (S_2 / S_1)^{1/n}$$

Donde  $t$  corresponde a la tasa de cambio;  $S_1$  es la superficie cubierta por un tipo dado de uso/cobertura del suelo en la fecha 1;  $S_2$  es la superficie del mismo uso/cobertura del suelo en la fecha 2 y;  $n$  es el número de años transcurridos entre las dos fechas.

## RESULTADOS

### Mapas de cobertura vegetal y uso del suelo: 1989 y 2009

Se obtuvieron dos mapas de uso de suelo y vegetación de la PSEM de los años 1989 y 2009, producto de la aplicación de procesos relacionados con la corrección radiométrica, corrección atmosférica, interpretación de imágenes de satélite (Landsat TM) y el método supervisado máxima verosimilitud (Figs. 2a y 2b). La leyenda de estos mapas corresponde, para el primer año, cuatro categorías: Bosque (Bs), Cuerpos de agua (Ca), Agropecuario (Agp) y Asentamientos humanos (Ah) y; para el segundo, se anexó la categoría Agricultura tecnificada controlada (Atc) [cinco categorías].

TABLA 4. Matriz de cambios o tabulación cruzada.

		fecha 1 ( $f_1$ )				Total ( $f_2$ )
		Categoría 1 ( $f_1$ )	Categoría 2 ( $f_1$ )	Categoría 3 ( $f_1$ )	Categoría n ( $f_1$ )	
fecha 2 ( $f_2$ )	Categoría 1 ( $f_2$ )	<b>Categoría 1 (<math>f_1</math>)</b> <b>Categoría 1 (<math>f_2</math>)</b>	Categoría 2 ( $f_1$ ) Categoría 1 ( $f_2$ )	Categoría 3 ( $f_1$ ) Categoría 1 ( $f_2$ )	Categoría n ( $f_1$ ) Categoría 1 ( $f_2$ )	Total Categoría 1 ( $f_2$ )
	Categoría 2 ( $f_2$ )	Categoría 1 ( $f_1$ ) Categoría 2 ( $f_2$ )	<b>Categoría 2 (<math>f_1</math>)</b> <b>Categoría 2 (<math>f_2</math>)</b>	Categoría 3 ( $f_1$ ) Categoría 2 ( $f_2$ )	Categoría n ( $f_1$ ) Categoría 2 ( $f_2$ )	Total Categoría 2 ( $f_2$ )
	Categoría 3 ( $f_2$ )	Categoría 1 ( $f_1$ ) Categoría 3 ( $f_2$ )	Categoría 2 ( $f_1$ ) Categoría 3 ( $f_2$ )	<b>Categoría 3 (<math>f_1</math>)</b> <b>Categoría 3 (<math>f_2</math>)</b>	Categoría n ( $f_1$ ) Categoría 3 ( $f_2$ )	Total Categoría 3 ( $f_2$ )
	Categoría n ( $f_2$ )	Categoría 1 ( $f_1$ ) Categoría n ( $f_2$ )	Categoría 2 ( $f_1$ ) Categoría n ( $f_2$ )	Categoría 3 ( $f_1$ ) Categoría n ( $f_2$ )	<b>Categoría n (<math>f_1</math>)</b> <b>Categoría n (<math>f_2</math>)</b>	Total Categoría n ( $f_2$ )
Total ( $f_1$ )		Total Categoría 1 ( $f_1$ )	Total Categoría 2 ( $f_1$ )	Total Categoría 3 ( $f_1$ )	Total Categoría n ( $f_1$ )	Suma de los totales

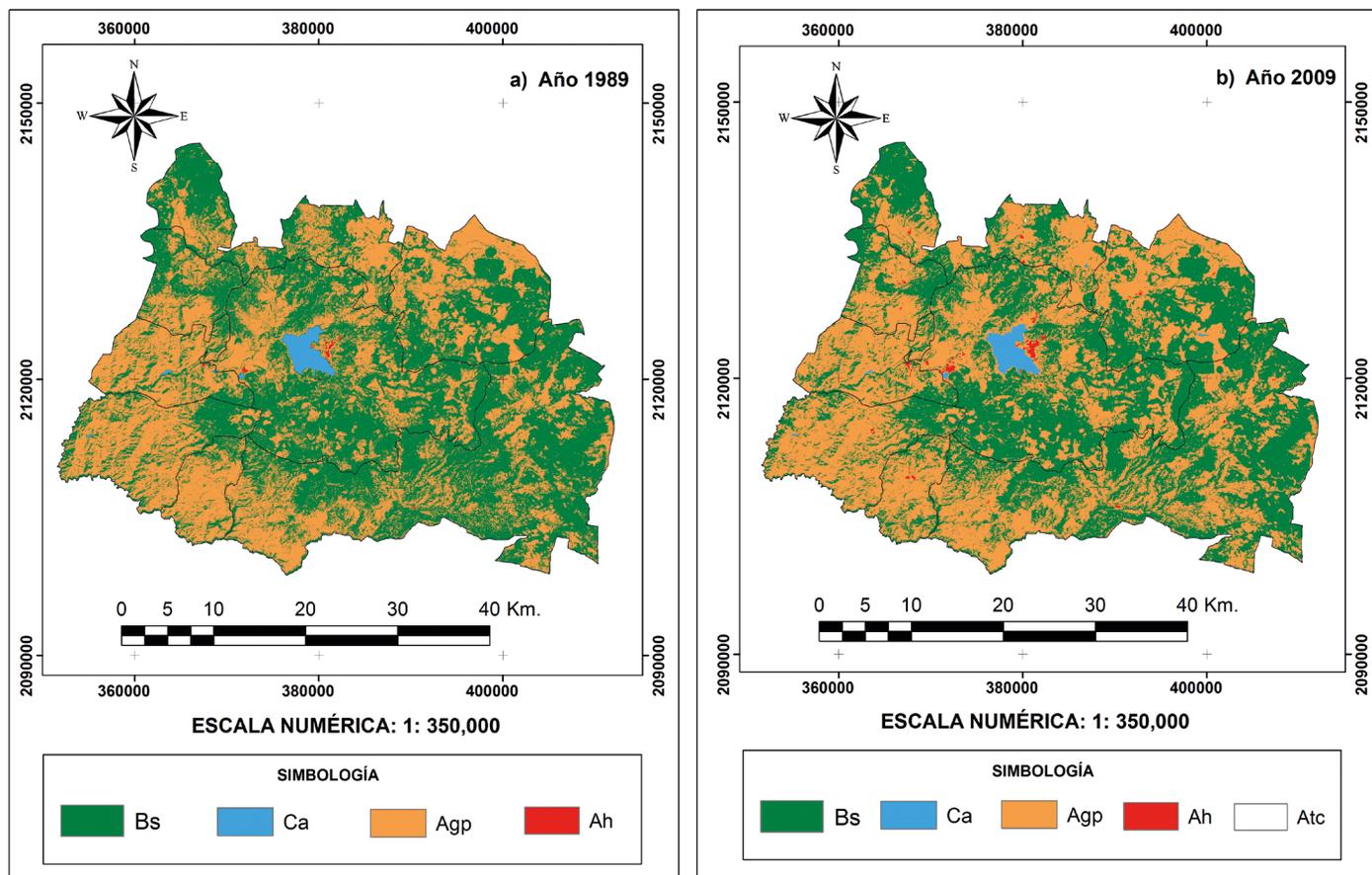


FIGURA 2. Mapas de uso de suelo y vegetación de la Porción Surponiente del Estado de México.

Fuente: Elaboración propia con base en Inegi (2009).

### Validación cartográfica

Los mapas de las figuras 2a y 2b fueron validados satisfactoriamente mediante puntos de verificación recopilados durante los recorridos de campo *in situ*. En las Tablas 5a y 5b se muestran las matrices de confusión derivadas de la confrontación entre los puntos de muestreo (clases de referencia) y las categorías del mapa, estas últimas, producto de la clasificación de los píxeles que comprenden a las imágenes Landsat TM de los años 1989 y 2009. En términos generales, para el mapa del año 1989, del total de 200 puntos de verificación, 169 coincidieron con las categorías de la leyenda del mapa clasificado y 31 pertenecen a una categoría diferente respecto de los píxeles clasificados (Tabla 5a). Para el mapa del año 2009, del total de 250 puntos de muestreo, 237 coincidieron con las categorías de la

leyenda del mapa clasificado y 13 corresponden a una categoría distinta (Tabla 5b).

En las tablas 6a y 6b se observan los mismos elementos descritos de las tablas anteriores (5a y 5b), es decir, la comparación entre los datos del mapa clasificado y la información recopilada en campo (clases de referencia), solo que los valores se encuentran expresados en proporción del número total de puntos de verificación: 200 para el primer año y 250 para el segundo.

Los valores de las tablas 7a y 7b son resultado de la aplicación del método de Card (1982), o sea, los coeficientes que comprenden a estas son producto del ajuste o correcciones a los cuales se sometieron los datos que caracterizan a las tablas 6a y 6b. La suma de las columnas de las matrices corregidas es igual a la proporción de la categoría representada en el mapa.

TABLA 5. Matrices de confusión: a) Año 1989 y b) Año 2009.

a) Año 1989		Verdad imagen / Categorías del mapa					
		Bosque	Cuerpos de agua	Agropecuario	Asentamientos humanos	Total Verdad Terreno	
Verdad terreno / Clases de referencia	Bosque	<b>40</b>	0	10	0	50	
	Cuerpos de agua	0	<b>45</b>	5	0	50	
	Agropecuario	3	0	<b>47</b>	0	50	
	Asentamientos humanos	0	0	13	<b>37</b>	50	
Total Verdad Imagen		43	45	75	37	200	
b) Año 2009		Verdad imagen / Categorías del mapa					
		Bosque	Cuerpos de agua	Agropecuario	Asentamientos humanos	Agricultura tecnificada	Total Verdad Terreno
Verdad Terreno / Clases de referencia	Bosque	<b>50</b>	0	0	0	0	50
	Cuerpos de agua	0	<b>50</b>	0	0	0	50
	Agropecuario	0	0	<b>50</b>	0	0	50
	Asentamientos humanos	0	0	0	<b>50</b>	0	50
	Agricultura tecnificada	0	0	13	0	<b>37</b>	50
Total Verdad Imagen		50	50	63	50	37	250

Los datos de la tabla 8a muestran los coeficientes correspondientes a los índices de confiabilidad e intervalos de confianza de los mapas clasificados (año 1989 y año 2009), principalmente, los relacionados con: 1) la confiabilidad global; 2) el intervalo de confianza de la fiabilidad estimada; 3) la confiabilidad del usuario; 4) el error de comisión; 5) el intervalo de confianza de la confiabilidad del usuario; 6) la confiabilidad del productor; 7) el error de omisión y; 8) el intervalo de confianza de la confiabilidad del productor. Los últimos seis se observan a nivel categoría. Por su parte, la tabla 8b exhibe los mismos elementos descritos en la tabla anterior (Tabla 8a), solo que los coeficientes incluidos en esta se obtuvieron a partir de los valores que comprenden a las matrices de confusión corregidas por el método de Card (Tablas 7a y 7b).

#### Ajuste de las superficies derivadas de los mapas clasificados

En la tabla 9a se observa que, de 57% (102 031 ha) de la superficie de bosque que se encuentra representada en el mapa del año 1989, 93% (94 889 ha) corresponde efectivamente a esta categoría y 7% (7142 ha) restante pertenece, en realidad, a la categoría agropecuario. Por otro lado, 13.3% (9965 ha) de la superficie cartografiada como agropecuario corresponde realmente a la categoría bosque. Por tanto, la proporción corregida del bosque en el área de estudio es producto de la suma correspondiente a 93% de la proporción del bosque, a la cual, se le adiciona 13.3% de la proporción cartografiada como agropecuario ( $0.93 \times 0.57 + 0.133 \times 0.42$ ), obteniendo como resultado 58.6% (104 752 ha).



TABLA 6. Matrices de confusión expresada en proporción: a) Año 1989 y b) Año 2009.

a) Año 1989		Verdad imagen / Categorías del mapa					
		Bosque	Cuerpos de agua	Agropecuario	Asentamientos humanos	Total Verdad Terreno	
Verdad terreno / Clases de referencia	Bosque	<b>0.20</b>	0	0.05	0	0.25	
	Cuerpos de agua	0	<b>0.225</b>	0.025	0	0.25	
	Agropecuario	0.015	0	<b>0.235</b>	0	0.25	
	Asentamientos humanos	0	0	0.065	<b>0.185</b>	0.25	
Total Verdad Imagen		0.215	0.225	0.375	0.185	1.00	
Proporción representada en el mapa		0.57	0.009	0.42	0.0009	1.00	
b) Año 2009		Verdad imagen / Categorías del mapa					
		Bosque	Cuerpos de agua	Agropecuario	Asentamientos humanos	Agricultura tecnificada	Total Verdad Terreno
Verdad terreno / Clases de referencia	Bosque	<b>0.20</b>	0	0	0	0	0.20
	Cuerpos de agua	0	<b>0.20</b>	0	0	0	0.20
	Agropecuario	0	0	<b>0.20</b>	0	0	0.20
	Asentamientos humanos	0	0	0	<b>0.20</b>	0	0.20
	Agricultura tecnificada	0	0	0.052	0	<b>0.148</b>	0.20
Total Verdad Imagen		0.20	0.20	0.252	0.20	0.148	1.00
Proporción representada en el mapa		0.51	0.01	0.47	0.003	0.0001	1.00

Esto se debe al error de omisión ocurrido en la categoría bosque, por tanto, la superficie que comprende a esta se encuentra sub-representada en el mapa con 57%, cuando en realidad ocupa 58.6% del área de estudio (Tabla 10a).

Las categorías cuerpos de agua y asentamientos humanos, también se encuentran subrepresentadas en el mapa del año 1989, con 0.9% (1643 ha) y 0.1% (162 ha), respectivamente. La proporción correcta que corresponde a estas categorías es 3.7% (6614 ha) para cuerpos de agua y 7.4% (13 228 ha) para asentamientos humanos. Por su parte, la clase agropecuario se halla sobrerrepresentada (producto de los errores de comisión en esta categoría) con

42% (74 922 ha), siendo que realmente le corresponde 30.3% de proporción (Tabla 10a).

En la tabla 9b se observa que, tanto la proporción del bosque como la de cuerpos de agua, no se sometieron a correcciones, producto de la ausencia de errores de omisión y comisión. Sin embargo, es de resaltar que, la categoría agropecuario está sobrerrepresentada en el mapa del año 2009, con 47% (84 616 ha) de proporción, cuando en realidad le corresponde 37% (66 140 ha). Por su parte, las categorías asentamientos humanos y agricultura tecnificada controlada se encuentran subrepresentadas, con 0.3% (578 ha) y 0.01% (24 ha) de proporción, respectivamente. La proporción correcta que corresponde a estas

TABLA 7. Matrices de confusión expresadas en proporción y corregidas por el método de Card (1982): a) Año 1989 y b) Año 2009.

a) Año 1989		Verdad imagen / categorías del mapa					
		Bosque	Cuerpos de agua	Agropecuario	Asentamientos humanos	Total Verdad Terreno	
Verdad terreno / Clases de referencia	Bosque	<b>0.53</b>	0	0.056	0	0.586	
	Cuerpos de agua	0	<b>0.009</b>	0.028	0	0.037	
	Agropecuario	0.04	0	<b>0.263</b>	0	0.303	
	Asentamientos humanos	0	0	0.073	<b>0.0009</b>	0.0739	
Total Verdad Imagen		0.57	0.009	0.42	0.0009		
Proporción representada en el mapa		0.57	0.009	0.42	0.0009		
b) Año 2009		Verdad imagen / categorías del mapa					
		Bosque	Cuerpos de agua	Agropecuario	Asentamientos humanos	Agricultura tecnificada	Total Verdad Terreno
Verdad terreno / Clases de referencia	Bosque	<b>0.51</b>	0	0	0	0	0.51
	Cuerpos de agua	0	<b>0.01</b>	0	0	0	0.01
	Agropecuario	0	0	<b>0.373</b>	0	0	0.373
	Asentamientos humanos	0	0	0	<b>0.003</b>	0	0.003
	Agricultura tecnificada	0	0	0.097	0	<b>0.0001</b>	0.0971
Total Verdad Imagen		0.51	0.01	0.47	0.003	0.0001	
Proporción representada en el mapa		0.51	0.01	0.47	0.003	0.0001	

categorías es 1% (1788 ha) para asentamientos humanos y 10% (17 876 ha) para agricultura tecnificada controlada (Tabla 10b).

#### Dinámica y procesos de cambio en la PSEM: 1989 - 2009

La tabla 11 corresponde a la matriz de cambios de la PSEM del período que comprende los años 1989 y 2009. En esta tabla se muestra la superficie de cada categoría (en hectáreas) y para cada año, así como los cambios, en términos del incremento, disminución o permanencia del área de cada cobertura y uso del suelo que caracterizan a este territorio. En términos absolutos, en el año 1989 el bosque

tenía una superficie de 102 031 ha, para el año 2009 se conservaron (permanecieron) solamente 82 769 ha, resultado de un proceso de deforestación. Por tanto, se eliminaron 19 262 ha de bosque, las cuales fueron ocupadas por otras categorías: cuerpos de agua (105 ha), agropecuario (19 113 ha), asentamientos humanos (39 ha) y agricultura tecnificada controlada (5 ha).

El bosque, también experimentó un proceso de revegetación, acción que coadyuvó al incremento de la superficie conservada, es decir, a 82 769 ha de bosque que pertenecían al área conservada (permanencia), se adicionaron 9018 ha de superficie recuperada, de las cuales 5.8 ha pertenecían a cuerpos de agua, 9012 ha a agropecuario



TABLA 8. Coeficientes de los índices de confiabilidad e intervalos de confianza.

		Categorías o clases					Confiabilidad global (%)	Intervalo de confianza de la confiabilidad global (%)	
		Bosque (%)	Cuerpos de agua (%)	Agropecuario (%)	Asentamientos humanos (%)	Agricultura tecnificada controlada (%)			
a) Matrices de confusión	Año 1989	Confiabilidad del usuario	93.02	100	62.67	100			
		Error de comisión	6.98	0	37.33	0			
		Intervalo de confianza de la confiabilidad del usuario	17.52	0	21.23	0			
		Confiabilidad del productor	80.0	90.0	94.0	74.0			
		Error de omisión	20.0	10.0	6.0	26.0			
		Intervalo de confianza de la confiabilidad del productor	0.020	0.020	0.013	0.175		84.50	5.54
	Año 2009	Confiabilidad del usuario	100.0	100.0	79.37	100.0	100.0		
		Error de comisión	0	0	20.63	0	0		
		Intervalo de confianza de la confiabilidad del usuario	0	0	19.99	0	0		
		Confiabilidad del productor	100.0	100.0	100.0	100.0	74.0		
		Error de omisión	0	0	0	0	26.0		
		Intervalo de confianza de la confiabilidad del productor	0	0	0	0	0.301	94.80	4.96
	b) Matrices de confusión corregidas por el método de card (1982)	Año 1989	Confiabilidad del usuario	92.98	100.0	62.62	100.0		
			Error de comisión	7.02	0	37.38	0		
			Intervalo de confianza de la confiabilidad del usuario	7.08	0	13.41	0		
Confiabilidad del productor			90.44	24.32	86.80	1.22			
Error de omisión			9.56	75.68	13.20	98.78			
Intervalo de confianza de la confiabilidad del productor			0.051	0.0001	0.019	0.00003		80.29	6.93
Año 2009		Confiabilidad del usuario	100.0	100.0	79.36	100.0	100.0		
		Error de comisión	0	0	20.64	0	0		
		Intervalo de confianza de la confiabilidad del usuario	0	0	11.22	0	0		
		Confiabilidad del productor	100.0	100.0	100.0	100.0	0.10		
		Error de omisión	0	0	0	0	99.90		
		Intervalo de confianza de la confiabilidad del productor	0	0	0	0	0.000005	89.61	5.27

TABLA 9. Probabilidades de asignación de las categorías mapeadas.

a) Año 1989		Probabilidades					
		Bosque	Cuerpos de agua	Agropecuario	Asentamientos humanos	Superficie (ha)	
Sitios de muestreo/ Clases de referencia	Bosque	<b>0.93</b>	0	0.133	0	102 031	
	Cuerpos de agua	0	<b>1.00</b>	0.066	0	1643	
	Agropecuario	0.07	0	<b>0.626</b>	0	74 922	
	Asentamientos humanos	0	0	0.174	<b>1.00</b>	162	
	Proporción en el mapa	0.57	0.009	0.42	0.001	178 758	
b) Año 2009		Probabilidades					
		Bosque	Cuerpos de agua	Agropecuario	Asentamientos humanos	Agricultura tecnificada controlada	Superficie (ha)
Sitios de muestreo/ Clases de referencia	Bosque	<b>1.00</b>	0	0	0	0	91 787
	Cuerpos de agua	0	<b>1.00</b>	0	0	0	1753
	Agropecuario	0	0	<b>0.794</b>	0	0	84 616
	Asentamientos humanos	0	0	0	<b>1.00</b>	0	578
	Agricultura tecnificada controlada	0	0	0.206	0	<b>1.00</b>	24
Proporción en el mapa		0.51	0.01	0.47	0.003	0.0001	178 758

y 0.2 ha a asentamientos humanos, obteniendo 91 787 ha de superficie total para el año 2009. A pesar de que la categoría bosque experimentó un proceso de recuperación o revegetación, el área correspondiente a la deforestación es mucho mayor, por lo que, es conveniente mencionar que esta categoría experimentó, de manera general, un proceso de deforestación.

Por su parte, las categorías cuerpos de agua, agropecuario y asentamientos humanos, registraron un notable incremento en su superficie, a pesar de la presencia de procesos vinculados con el ascenso y descenso en la cobertura que comprende a cada una de estas. Este incremento puede atribuirse a actividades relacionadas con la apertura de nuevos reservorios de agua (cuerpos de agua artificiales:

bordos y presas) y procesos asociados con la urbanización, la revegetación y expansión de la frontera agropecuaria.

A partir de la superficie de cada categoría registrada en la matriz de cambios, así como la correspondiente al área corregida por el método de Card (Tabla 10), se calcularon las tasas de cambio para cada cobertura y uso del suelo en el período de estudio (20 años). Con base en las primeras superficies (matriz de cambios), resalta, principalmente, la tasa anual de pérdida en la categoría bosque (-0.56%), así como las tasas anuales de incremento en las categorías: cuerpos de agua (0.31%), agropecuario (0.57%) y asentamientos humanos (3.60%). Respecto de la superficie corregida, resaltan las tasas anuales de pérdida de las categorías: bosque (-0.75%), cuerpos de agua



TABLA 10. Coeficientes de la proporción y superficie de las categorías resultado del ajuste de los errores de clasificación.

Categorías	a) Año 1989		b) Año 2009	
	Proporción corregida	Superficie corregida (ha)	Proporción corregida	Superficie corregida (ha)
Bosque	0.586	104 752.2	0.51	91 166.6
Cuerpos de agua	0.037	6614.0	0.01	1787.6
Agropecuario	0.303	54 163.7	0.37	66 140.5
Asentamientos humanos	0.074	13 228.1	0.01	1787.6
Agricultura tecnificada controlada			0.1	17 875.8
Total	1.00	178 758	1.00	178 758

TABLA 11. Matriz de cambios de la Porción Surponiente del Estado de México. Período: 1989-2009.

	Fecha 1 (1989)				
	Bosque	Cuerpos de agua	Agropecuario	Asentamientos humanos	Total año 2009
Bosque	<b>82 769.40</b>	5.76	9011.43	0.18	91 786.77
Cuerpos de agua	105.48	<b>1613.07</b>	34.65	0.00	1753.20
Agropecuario	19 113.12	24.21	<b>65 468.07</b>	10.71	84 616.11
Asentamientos humanos	38.70	0.00	388.98	<b>150.66</b>	578.34
Agricultura tecnificada controlada	4.68	0.00	19.26	0.00	23.94
Total año 1989	102 031.38	1643.04	74 922.39	161.55	<b>178 758.36</b>

(-13.50%) y asentamientos humanos (-32%). Por su parte, la clase agropecuario fue la única categoría que registró una tasa anual de incremento, con 0.91% (Fig. 3).

## DISCUSIÓN

### Evaluación de la confiabilidad temática

Los resultados derivados del proceso de evaluación de la confiabilidad temática muestran que, los mapas de uso de suelo y vegetación de los años 1989 y 2009 de la PSEM exceden el porcentaje mínimo permisible de validación cartográfica que corresponde a 80% (Mas *et al.*, 2003;

Lesschen *et al.*, 2005; Franco *et al.*, 2006a). Además, es conveniente mencionar que estos mapas fueron validados satisfactoriamente, producto de la aplicación del método de muestreo aleatorio estratificado (Stehman, 2000; Mas *et al.*, 2003; Mas y Couturier, 2011) y mediante las actividades de recopilación y ubicación espacial de los sitios de verificación (tamaño de la muestra) realizadas en campo (Valdez *et al.*, 2011).

Las ventajas, en cuanto a la aplicación del método de muestreo utilizado en el presente estudio se sustentan en los siguientes aspectos. La estratificación, en una primera instancia, permitió distribuir el esfuerzo de muestreo con

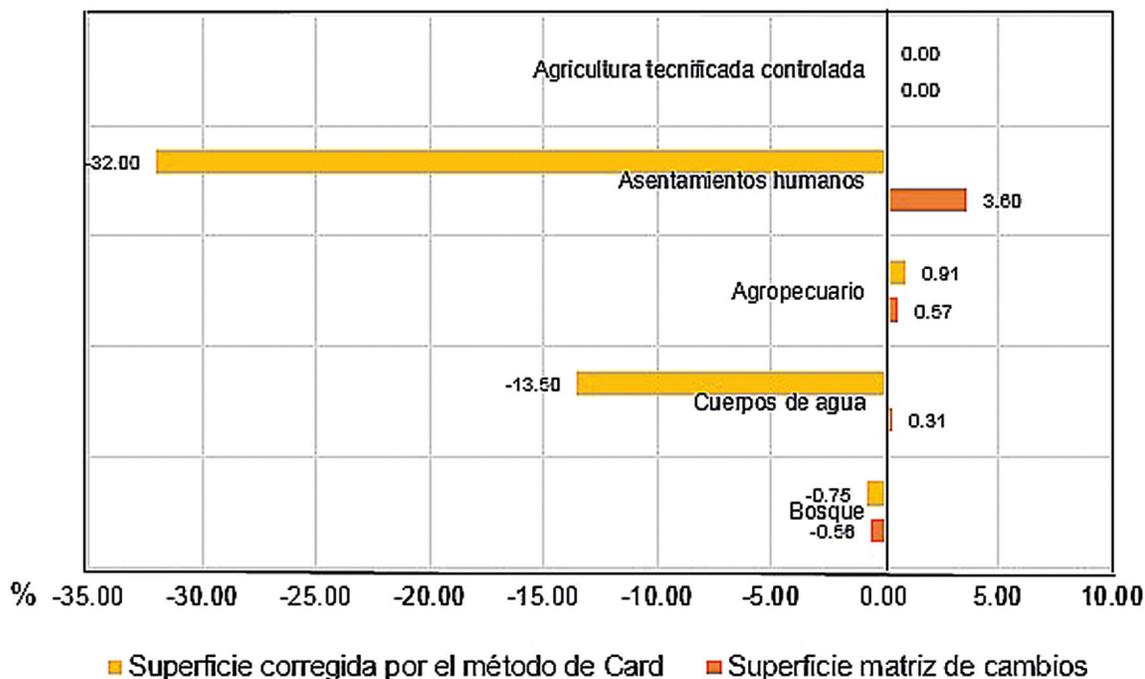


FIGURA 3. Tasa anual de cambios en las coberturas y usos del suelo de la Porción Surponiente del Estado de México. Período: 1989-2009.

base en las categorías de análisis y considerando las áreas geográficas de menor accesibilidad (zonas con probabilidades de muestreo más bajas); segundo, garantizó y, al mismo tiempo, evitó que las categorías que se hallan representadas en los mapas clasificados, especialmente, las de mayor superficie, no se sobremuestrearan en relación a las de menor extensión (Card, 1982) y; tercero, el considerar los dos puntos anteriores y, desde luego, un tamaño de muestra aceptable (Congalton, 1988; Congalton, 1991), coadyuvó a optimizar el tiempo destinado para los recorridos de campo *in situ* y, desde luego, a minimizar los costos requeridos durante esta actividad de carácter geográfico.

Por otra parte, al realizar el análisis comparativo de los coeficientes asociados con los índices de fiabilidad, así como los relacionados con los intervalos de confianza de la tabla 8, se observa que existen variaciones notables. A manera de ejemplo, los valores de confiabilidad global de la tabla 8a (matrices de confusión), son mayores en comparación a los obtenidos en la tabla 8b (matrices de confu-

sión corregidas por el método de Card). Por el contrario y, es obvio, los coeficientes correspondientes a los intervalos de confianza de la confiabilidad global de las primeras matrices, son menores en relación a los que se hallan en la segundas matrices. Este comportamiento se atribuye a que, en el primer caso, el cálculo de los índices de fiabilidad e intervalos de confianza se realizó sin considerar el tipo de muestreo (Mas y Couturier, 2011) utilizado en el presente estudio. Es hasta el segundo caso, cuando el cálculo de estos indicadores se llevó a cabo a partir del ajuste o correcciones a las cuales se sometieron las primeras matrices, producto de la aplicación del método aleatorio estratificado.

#### Corrección de las superficies derivadas de los mapas clasificados

Los resultados obtenidos del ajuste de las superficies de cada categoría representada en los mapas de uso de suelo y vegetación de la PSEM (años 1989 y 2009) muestran que, debido a los errores de omisión registrados en las catego-



rías bosque, cuerpos de agua y asentamientos humanos en el mapa del año 1989, la superficie de estas categorías se encuentra subestimada. Por el contrario, el área de la clase agropecuario está sobreestimada, producto de los errores de comisión en esta categoría (Mas y Couturier, 2011). Para el año 2009, se observa que esta misma categoría se encuentra sobreestimada y, en contraparte, las clases asentamientos humanos y agricultura tecnificada controlada están subestimadas.

El proceso de ajuste o corrección aplicado a las superficies derivadas de los mapas clasificados, fue de suma importancia para el cálculo de las tasas anuales de cambio de cada categoría. Esto conllevó a realizar interpretaciones con mayor certeza y validez estadística, respecto de la dinámica y los procesos de cambio que experimentaron las coberturas y usos del suelo de la PSEM en el período de análisis (1989 – 2009).

#### Dinámica y procesos de cambio en la PSEM: 1989 - 2009

Los cambios ocurridos en los distintos paisajes naturales y socioculturales que comprenden a la PSEM están relacionados, principalmente, con la disminución y pérdida de los ecosistemas terrestres de bosque. Los resultados presentados muestran que efectivamente este territorio ha experimentado un proceso de deforestación en un período de 20 años. Resalta la tasa de decremento de la categoría bosque, tanto la obtenida a partir de la superficie incluida en la matriz de cambios (-0.56%), así como la derivada de la superficie corregida de esta categoría (-0.75%). Otro resultado relevante, es el incremento de la tasa anual de la categoría agropecuario, que corresponde a 0.57% y 0.91%, respectivamente. Este comportamiento puede atribuirse al crecimiento o expansión de la frontera agrícola y al establecimiento de nuevos espacios destinados a la práctica de actividades relacionadas con el sector pecuario, en terrenos con vocación forestal.

Con base en los resultados de la matriz de cambios se puede afirmar que, la superficie correspondiente a la categoría agropecuario se incrementó a expensas del área que comprendía a los bosques de la PSEM. Este análisis se sus-

tenta en la aplicación de la observación directa, es decir, durante los recorridos de campo *in situ* se observó que la superficie cubierta por los bosques que caracterizan a este territorio, disminuyó por la práctica de actividades relacionadas, principalmente, con la tala clandestina, incendios forestales, la roza, tumba y quema y la apertura de nuevos espacios agrícolas y ganaderos en sistemas de lomeríos, con pendientes mayores a 45 grados. Estas dos últimas actividades son evidentes en Otzoloapan, Zacazonapan, Santo Tomás de los Plátanos e Ixtapan del Oro (municipios que integran la PSEM).

#### CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en el presente estudio son similares a los reportados en otras investigaciones relacionadas con la temática y, sobre todo, elaboradas en el territorio que comprende el Estado de México. Pineda *et al.* (2009) determinaron que, en el período que comprendió los años 1993 y 2002, las zonas agrícolas del territorio mexiquense incrementaron su superficie, sobre todo, la agricultura de temporal, mientras que las áreas cubiertas por los distintos bosques que caracterizan a este espacio geográfico decrecieron. Pineda (2010) resalta que, el crecimiento de las áreas de pastizal en el territorio del Estado de México se produjo a costa de los bosques primarios y secundarios y la selva primaria y secundaria. Por su parte, Juan (2013) elaboró un trabajo en una región del altiplano mexicano, el resultado más significativo de este estudio corresponde a la pérdida de la cobertura forestal, en un período de 25 años.

Otro resultado importante, según los coeficientes obtenidos en relación a las tasas anuales de cambio derivadas de las superficies corregidas de cada categoría, fue la disminución acelerada de la categoría asentamientos humanos, registrando una tasa anual de cambio de -32%. Este dato ocasiona cierta incertidumbre, o bien, incongruencia respecto de los datos reportados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi, 1990 y 2010), donde la tasa de crecimiento promedio anual de la población que habita el territorio de la PSEM corresponde a 2.33% en un período de 20 años. Por el contrario, la tasa

anual de cambio de esta misma categoría (asentamientos humanos), pero derivada de las superficies que corresponden a esta (años 1989 y 2009) y que se hallan incluidas en la matriz de cambios, muestra un incremento de 3.60% (valor casi equiparable a lo registrado por la institución referida).

Por su parte, la categoría cuerpos de agua, también registró variaciones respecto de la tasa anual de cambio. Cero punto treinta y uno por ciento corresponde a la tasa derivada de las superficies de esta categoría (años 1989 y 2009) que se encuentran inmersas en la matriz de cambios, y -13.50% corresponde a la tasa obtenida a partir de las superficies corregidas. Con base en el trabajo de campo, principalmente, a través de los recorridos *in situ* y la aplicación de la observación directa, se puede deducir que la superficie que comprende a esta categoría ha disminuido considerablemente, a pesar de la construcción y existencia de nuevos cuerpos de agua artificiales, como la presa Corral de Piedra, ubicada en el municipio de Amalco de Becerra y los bordos de agua (en los municipios de Donato Guerra, Valle de Bravo y Zacazonapan) que sirven de abastecimiento para las actividades relacionadas con la agricultura de riego, principalmente.

El decremento de la superficie de la categoría cuerpos de agua es notorio. Resaltan, sobre todo, el caso de la Presa Santa Bárbara, ubicada en el municipio de Santo Tomás de los Plátanos y el cuerpo de agua Los Pinzones, este último localizado en el municipio de Otzoloapan. Por su parte, en la Presa Ixtapantongo, que forma parte de los municipios de Valle de Bravo y Santo Tomás de los Plátanos, se observó un proceso acelerado de eutrofización que, con frecuencia, ocasiona la proliferación en abundancia de algas verdes. En la práctica, es decir, durante el proceso de clasificación de la imagen de satélite del año 2009 (aplicación del algoritmo máxima verosimilitud), la superficie que correspondía a este cuerpo de agua fue clasificada como parte del área que comprende a la categoría agropecuario (producto de los valores de reflectancia), situación que ocasionó, por una parte, la disminución de la superficie de la primera categoría y, por la otra, el aumento del área de la segunda categoría.

## REFERENCIAS

- Antonio, X., E. Treviño, J. Jiménez, H. Villalón y J. Nívar. 2006. Cambios en la vegetación en la Subcuenca del Río Pílon, Nuevo León, México. *Revista Chapingo Serie Ciencia Forestales y del Ambiente* 12(1):5-11.
- Buendía, E., S. Terrazas, E. Vargas. 2002. Aplicación de imágenes de satélite en la cartografía de uso de suelo y vegetación en una región del Oriente del Valle de México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 8(1):13-19.
- Burrough, P. 1994. Accuracy ad error GIS. *In*: D. Green y D. Rix, eds. The AGÍ sourcebook for geographic information systems 1995. AGÍ. Londres. p:87-91.
- Camacho, J., J. Juan, R. Franco, N. Pineda, J. Campos, X. Antonio y M. Balderas. 2011. Procesos y cambios de ocupación del suelo en un espacio geográfico de México. 1976 y 1993. *Mapping Centroamérica y El Caribe* (2):61-67.
- Card, H. 1982. Using known map category marginal frequencies to improve estimates of thematic map accuracy. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 48(3):431-439.
- Challenger, A. 1998. Utilización y conservación de los ecosistemas terrestres de México. Pasado, presente y futuro. Conabio. Instituto de Biología-UNAM, Agrupación Sierra Madre, S.C. 847 p.
- Champo, O., L. Valderrama y M. España. 2012. Pérdida de cobertura forestal en la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca, Michoacán, México (2006-2010). *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 18(2):143-157.
- Chapa-Bezanilla, D., J. Sosa y A. de Alba. 2008. Estudio multi-temporal de fragmentación de los bosques en la Sierra Fría, Aguascalientes, México. *Madera y Bosques* 14(1):37-51.
- Congalton, R. 1988. A comparison of sampling scheme use in generating error matrices for assessing the accuracy of maps generated from remotely sensed data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 54(5):593-600.
- Congalton, R. 1991. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of the Environment* 37:35-46.



- Cortina, V., P. Macario y Y. Ogneva-Himmelberguer. 1998. Cambios en el uso del suelo y deforestación en el sur de los estados de Campeche y Quintana Roo, México. *Investigaciones geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM* (38):41-56.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 1996. Forest resources assessment 1990. Survey of tropical forest cover and study of change processes. FAO. Roma.
- Flores Villela, O. y P. Gerez. 1994. Biodiversidad y conservación en México: vertebrados, vegetación y uso del suelo. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Franco, S., H. Regil y J. Ordóñez. 2006a. Dinámica de perturbación-recuperación de las zonas forestales en el Parque Nacional Nevado de Toluca. *Madera y Bosques* 12(1):17-28.
- Franco, S., H. Regil, C. González y G. Nava. 2006b. Cambio de uso del suelo y vegetación en el Parque Nacional Nevado de Toluca, México, en el período 1972-2000. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM* (61):38-57.
- Franco, S., H. Regil, C. González y G. Nava. 2006c. Cambio de uso del suelo y vegetación en el Parque Nacional Nevado de Toluca, México, en el período 1972-2000 (parte b). *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM* (61):38-57.
- García, T. y J. Mas. 2008. Comparación de metodologías para el mapeo de la cobertura y uso del suelo en el Sureste de México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM* (67):7:19.
- García, J., J. Gutiérrez, J. Juan y M. Balderas. 2012. Procesos de cambio en el uso del suelo de una microcuenca en el altiplano mexicano. El caso del río San José en el Estado de México. *Papeles de Geografía* (55-56):63-73.
- Goodchild, M., S. Gouquing y Y. Shiren. 1992. Development and test of an error model for categórica! data. *International Journal of Geographical Information Systems* 6:87-104.
- Halffter, G. 1978. Un patrón de dispersión en la Zona de Transición Mexica: el mesoamericano de montaña. *Folia Entomológica Mexicana* 39-40:219-222.
- Inegi (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2009. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. México.
- Inegi (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2010. Censo de Población y Vivienda México, 2010.
- Jensen, J. 1996. Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective. 2a. ed. Prentice-Hall. Upper Saddle River. NJ.
- Juan, J, J. Gutiérrez-Cedillo, X. Némiga, M. Balderas-Plata y J. Ramírez-Dávila. 2010. Multifuncionalidad y manejo campesino del chapulixtle (*Dodonae viscosa*) en una región cálida del Estado de México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo* 7 1):17-33.
- Juan, J. 2013. Análisis del cambio de uso del suelo en una región del altiplano mexicano. Retos e impactos: 1986-2011. *Oidles* 7 (13). Disponible en <http://www.eumed.net/rev/oidles/13/cambio-uso-suelo.html>.
- Lambin, E.F., B.L. Turner, H.J. Geist, S.B. Agbola, A. Angelsen, J.W. Bruce, O.T. Coomes, R. 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 y, J. Xu. 2001. The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. *Global Environmental Change* 11(4): 261-269.
- Lesschen, J., P. Verburg y S. Staal. 2005. Statistical methods for analysing the spatial dimension of change: Land use and farming systems. LUCC Report Series No. 7. Land-Use and Land-Cover Change (LUCC) Project. Netherlands: The International Livestock Research Institute, Nairobi, Kenya & Wageningen University.
- Lira, J. 2010. Tratamiento digital de imágenes multiespectrales. 2ª ed. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 584 p.
- Luneta, R., R. Congalton, L. Fnstermarker, J. Jensen, K. McGw y L. Tinney. 1991. Remote sensing and geographic information systems data integration: error sources and research issues. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 57 (6):677-687.
- Mas, J., J. Reyes y A. Pérez. 2003. Evaluación de la confiabilidad temática de mapas o de imágenes clasificadas: una

- revisión. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM* (51):53-72.
- Mas, J. y S. Couturier. 2011. Evaluación de bases de datos cartográficas. *In: F. Bautista, ed. Técnicas de muestreo para manejadores de recursos naturales. CIGA, IG. México, D.F. p:675-703.*
- Mausel, P., J. Kramber y J. Lee. 1990. Optimum band selection for supervised classification of multispectral data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 56 (1):55-60.
- Millington, A. y R. Alexander. 2000. Vegetation mapping in the last three decades of the twentieth century. *In: A. Millington y R. Alexander, eds. Vegetation mapping. John Wiley y Sons, Chochester, Inglaterra. p:321-331.*
- Myers, N. 1998. Global biodiversity priorities and expanded conservation policies. *In: G.M. Mace, A. Balmford y B.R. Ginsberg, eds. Conservation in a changing world. Cambridge University Press. p:273-285.*
- Nájera, O., J. Bojórquez, J. Cifuentes y S. Marceleño. 2010. Cambio de cobertura y uso del suelo en la Cuenca del Río Mololoa, Nayarit. *Biociencias* 1 (1):19-29.
- Pineda, N., J. Bosque y M. Gómez. 2008. Cambios de la ocupación del suelo y análisis de transiciones sistemáticas en el Estado de México (México) mediante Tecnologías de la Información Geográfica. Comunicaciones del XI Coloquio Ibérico de Geografía, Alcalá de Henares, Madrid, España.
- Pineda, N., J. Bosque, M. Gómez y W. Plata. 2009. Análisis de cambio del uso del suelo en el Estado de México mediante sistemas de información geográfica y técnicas de regresión multivariantes. Una aproximación a los procesos de deforestación. *Investigaciones geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM* (69):33-52.
- Pineda, N. 2010. Descripción, análisis y simulación de procesos forestales en el Estado de México mediante tecnologías de la información geográfica. Tesis doctoral. Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá, España.
- Rzedowski, J. 1978. Vegetación de México. 1a edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México. 504 p.
- USDA. 1995. Guidelines for the use of digital imagery for vegetation mapping. Washington, D.C. 176 p.
- Stehman, S. y R. Czaplewski. 1998. Design and analysis for thematic map accuracy assessment: fundamental principles. *Remote Sensing of Environment* 64:331-344.
- Stehman, S. 2000. Practical implications of design-based sampling inference for thematic map accuracy assessment. *Remote Sensing of Environment* 72:35-45.
- Valdez, J., C. Aguirre y G. Ángeles. 2011. Análisis de los cambios en el uso del suelo en la Cuenca del Río Metztlán (México) usando imágenes de satélite: 1985-2007. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 17(3):313-324.
- Velázquez, A., J. Mas, G. Díaz, S. Mayorga, P. Alcántara, R. Castro, T. Fernández, G. Bocco, E. Ezcurra y J. Palacio. 2002. Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México. *Gaceta Ecológica* (62):21-37.
- Veldkamp, A. y E. Lambin. 2001. Predicting land-use change. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 85:1-6.
- Villers, L., L. García y J. López. 1998. Evaluación de los bosques templados en México: una aplicación en el parque nacional Nevado de Toluca. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM* (36):7-19.
- Vitousek, P.M., H. A. Mooney, J. Lubchenco y J.M. Melillo. 1997. Human domination of Earth's ecosystems. *Science* 277:494-499.
- Walsh, J., D. Lightfoot y D. Buttler. 1987. Recognition and assessment of error in geographic information systems. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 53(10):1423-1430.
- Xiang, W.N. y K. C. Clarke. 2003. The use of scenarios in land-use planning. *Environment and Planning B: Planning and Design* 30(6):885-909.
- Zepeda, C., X. Antonio, A. Lot y D. Madrigal. 2012. Análisis del cambio del uso del suelo en las ciénegas de Lerma (1973-2008) y su impacto en la vegetación acuática. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM* (78):48-61.

Manuscrito recibido el 16 de enero de 2014.

Aceptado el 5 de agosto de 2014.

Este documento se debe citar como:

Camacho-Sanabria, J.M. J.I. Juan P., N.B. Pineda J., E.G. Cadena-Vargas, L.C. Bravo P. y M. Sánchez L. 2015. Cambios de cobertura/ uso del suelo en una porción de la Zona de Transición Mexicana de montaña. *Madera y Bosques* 21(1):93-112.