



Geografía y Sistemas de Información Geográfica (GEOSIG). Revista digital del Grupo de Estudios sobre Geografía y Análisis Espacial con Sistemas de Información Geográfica (GESIG). Programa de Docencia e Investigación en Sistemas de Información Geográfica (PRODISIG). Universidad Nacional de Luján, Argentina.

<http://www.revistageosig.wixsite.com/geosig> (ISSN 1852-8031)

Luján, Año 11, Número 13, 2019, Sección I: Artículos. pp. 68-88

CARACTERIZACIÓN DE LAS COBERTURAS TERRESTRES Y USOS DEL SUELO DE LA CIUDAD DE TOLUCA

Raúl Camacho Sanabria¹ - Miguel Ángel Balderas Plata² - José Manuel Camacho Sanabria³ - Víctor Manuel Hernández Madrigal⁴

¹Universidad Autónoma del Estado de México. Facultad de Química.

E-mail: r_3camacho@hotmail.com

²Universidad Autónoma del Estado de México. Facultad de Geografía.

E-mail: mabalderasp@uaemex.mx

³Universidad de Quintana Roo. División de Ciencias e Ingeniería.

E-mail: jmanuelcs@live.com.mx

⁴Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra. E-mail: vmhernan@umich.mx

RESUMEN

Actualmente, la expansión y desarrollo de actividades industriales y comerciales, en combinación con el alto crecimiento demográfico producen la demanda de nuevos espacios para la implementación de zonas industriales, comerciales y habitacionales, generando cambios de cobertura y uso de suelo. La presente investigación tiene por objetivo caracterizar las coberturas terrestres y usos de suelo de la Ciudad de Toluca (1986-2018), mediante la clasificación de imágenes de satélite, la validación cartográfica y la obtención de mapas de uso de suelo y vegetación de los años 1986 y 2018. Los resultados obtenidos expresan que, para el mapa del año 1986 las categorías representan las siguientes superficies, el bosque contenía 898.66 ha, los cuerpos de agua 27.17 ha, la agricultura y terrenos en descanso 9876.78 ha, el equipamiento urbano 302.74 ha y la zona habitacional 3473.40 ha. Con respecto al mapa del año 2018, el bosque contiene una superficie de 475.90 ha, los cuerpos de agua 12.49 ha, la agricultura y terrenos en descanso 4224.25 ha, el equipamiento urbano 987.24 ha y la zona habitacional 8878.85 ha. La pérdida y ganancia de superficies entre las categorías muestran que en un periodo de 32 años los cambios ocurridos son meramente urbanos.

Palabras clave: Coberturas y usos del suelo, tasas anuales de cambio, mapas de uso de suelo y vegetación, validación cartográfica.

ABSTRACT

Currently, the expansion and development of industrial and commercial activities, combined with the high population growth produce the demand for new spaces for the implementation of industrial, commercial and housing areas, generating changes in coverage and land use. The main objective of this research paper is to characterize land cover and land use of the City of Toluca (1986-2018), through the classification of satellite images, the cartographic validation and the obtaining of maps of land use and vegetation of the years 1986 and 2018. According to the results, for the map of 1986 the categories represent the following surfaces, the forest contained 898.66 ha, the bodies of water 27.17 ha, agriculture and lands in rest 9876.78 ha, urban equipment 302.74 ha and the housing area 3473.40 ha. With respect to the map of 2018, the forest contains an area of 475.90 ha, water bodies 12.49 ha, agriculture and land on rest 4224.25 ha, urban equipment 978.24 ha and housing area 8878.85 ha. The loss and gain of surfaces between the categories show that in a period of 32 years the changes occurred are merely urban.

Keywords: Covers and land usage, annual change rates, land use and vegetation maps, cartographic validation.

INTRODUCCIÓN

A pesar de la existencia de múltiples y diversas problemáticas ambientales locales, regionales y globales, los cambios de cobertura y uso de suelo (CCUS) se consideran como una de las principales causas que han contribuido al deterioro ambiental, por lo cual se ubican en el centro de la investigación ambiental. Su estudio puede abordarse a partir de numerosos estudios de caso publicados sobre la deforestación tropical, la degradación de los suelos en tierras secas, la intensificación de la agricultura, el cambio de la cobertura forestal, el cambio agrícola y la urbanización (Geist *et al.*, 2006).

Otros investigadores determinan que, la urbanización (demanda de espacios asociados al crecimiento poblacional desmedido), el comercio y la incorporación de zonas industriales provocan los cambios de cobertura y uso de suelo, además de fungir como un factor detonante en la sobreexplotación y disminución del agua subterránea (López, 2012; López, *et al.*, 2013; Candela *et al.*, 2015; Hernández y Flores, 2013; Solano *et al.*, 2015).

Actualmente en la localidad de Toluca de Lerdo (Ciudad de Toluca), la expansión y desarrollo de actividades industriales y comerciales, en combinación con el alto crecimiento demográfico, producen la demanda de nuevos espacios para la implementación de zonas industriales, comerciales y habitacionales, generando cambios de cobertura y uso de suelo, principalmente, de índole urbano.

Es así que el análisis de los CCUS en cualquier territorio conlleva a comprender como interactúan los diversos factores socioeconómicos y biofísicos que en él se encuentran (Pineda *et al.*, 2011). Por lo cual, los estudios de cambio de uso de suelo y vegetación son el referente para conocer las trayectorias de los distintos procesos de cambio (temporal y espacial) que existen en determinado territorio (Mas y Flamenco, 2011)

Dichos estudios de CCUS requieren, fundamentalmente, del uso y manejo de diversos materiales cartográficos, en específico, de mapas de uso de suelo y vegetación (USV), ya que a partir de estos se determinan, establecen e implementan políticas públicas (Millington y Alexander, 2000). En la actualidad, los insumos cartográficos para la elaboración de mapas de uso de suelo y vegetación están disponibles en diversas fuentes institucionales, en la red (internet) y centros de investigación (Mas y Couturier, 2011).

A partir de los mapas de USV se puede identificar, representar, describir, cuantificar, localizar, analizar, evaluar, explicar y modelar los procesos de cambio y la dinámica que ocurre en las diversas coberturas vegetales y usos del suelo de un tiempo y espacio determinado (Camacho *et al.*, 2015).

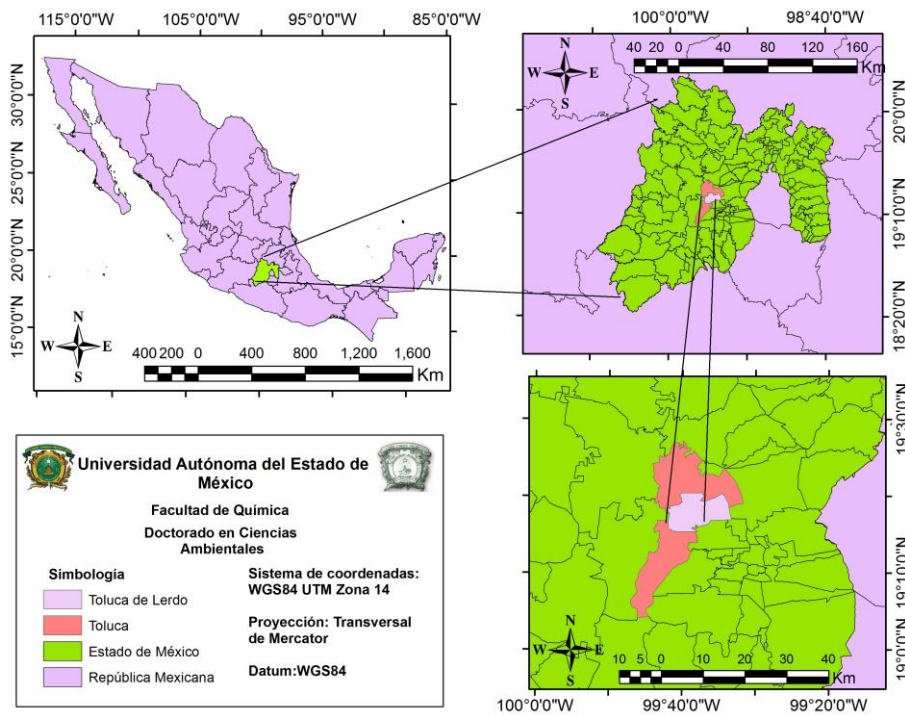
Con base en lo referido anteriormente, es necesario caracterizar las coberturas y uso de suelo en la Ciudad de Toluca, que requiere, no sólo del monitoreo, descripción y diagnóstico de los cambios que experimenta este espacio físico, sino que, actualmente es necesario que los mapas de uso de suelo y vegetación (resultado de la clasificación imágenes de satélite) se sometan a procesos relacionados con la evaluación de la confiabilidad cartográfica. Pues comprobar la fiabilidad de un producto cartográfico, principalmente la de los mapas de uso de suelo y vegetación, permite a los interesados tomar decisiones con base en dichos productos (Mas *et al.*, 2003).

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La Ciudad de Toluca se localiza en el municipio de Toluca ubicado en la porción centro de la República Mexicana, particularmente, en el territorio del Estado de México. Su ubicación geográfica corresponde a las coordenadas 19° 17' 32'' de latitud norte y 99° 39' 14'' de longitud oeste, su altitud oscila entre 2660 metros sobre el nivel del mar (msnm). Desde el punto de vista político-administrativo este territorio colinda, al norte con San Pablo Autopan, Calixtlahuaca, San Andrés Cuexcontitlán y San Mateo Otzacatipan, al sur con Cacalomacan, Santiago Tlacotepec y San Felipe Tlalmimilolpan, localidades del mismo municipio de Toluca, al oeste con el municipio de Zinacantepec y al este con los municipios de Metepec y Lerma (Figura N° 1) [INEGI, 2009].

Figura 1. Ubicación geográfica Toluca de Lerdo en el contexto estatal y nacional.



Fuente: Elaboración propia con base en INEGI (2018).

Materiales






Los insumos utilizados para la elaboración de los mapas de uso del suelo y vegetación de los años 1986 y 2018, fueron las imágenes de satélite de los sensores; a) Landsat Thematic Mapper (TM) de la época seca-fría, correspondiente a la fecha 23 de febrero de 1986 y; b) Landsat 8 de la época seca-fría, perteneciente a la fecha 10 de enero de 2018. Estos insumos fueron obtenidos de la plataforma digital Earth Explorer del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS).

Caracterización de las coberturas y uso de suelo de Toluca de Lerdo

Definición de variables

Las unidades de análisis de este estudio corresponden a las distintas coberturas y usos del suelo que se encuentran distribuidas espacialmente en el espacio físico que comprende a la localidad de Toluca de Lerdo. El reconocimiento de los usos y coberturas del suelo del área de estudio se sustentará en los criterios de identificación establecidos por Romero (2006), Moscoso (2006) y Pauleit *et al.* (2005) [Tabla N° 1].

Tabla. 1. Categorías o variables de análisis.

USO / COBERTURA	DESCRIPCIÓN
1) Agricultura y terrenos en descanso 	Incluye los cultivos de temporal, de sistemas de riego e invernaderos.
2) Bosque 	Espacios que actúan como vegetación arbórea
3) Cuerpos de agua 	Espacios que actúan como reservorios del componente agua de origen natural y artificial.
4) Equipamiento urbano 	Área artificial construida principalmente para uso comercial e industrial
5) Asentamientos humanos y viviendas 	Superficie artificial construida principalmente de uso habitacional

Fuente: Elaboración propia con base en Romero (2006), Moscoso (2006) y Pauleit *et al.* (2005).

Preclasificación

Mediante la combinación de las bandas (4-3-2), 4 (infrarrojo cercano), 3 (visible rojo) y 2 (visible verde), fue posible identificar e interpretar las clases de análisis, y sobre ésta se digitalizaron sitios o campos de entrenamiento (número de píxeles representativos por categoría).

La selección y distribución espacial de los campos de entrenamiento se realizó de forma aleatoria y homogénea, a través de la interpretación de imágenes de satélite, de recorridos de campo *in situ*, y en complemento con el manejo de un sistema de geoposicionamiento global (GPS).

Con base en lo anterior, se integró un mínimo de 50 campos para cada una de las categorías, es decir: a) para el año 1986 se establecieron un total de 380 puntos, de los cuales, 76 corresponden a bosque, 50 a cuerpos de agua, 100 a la agricultura, 50 de equipamiento urbano y 104 a los asentamientos humanos y; b) en cuanto al año 2018 se

establecieron 450 puntos, de los cuales, 70 representan al bosque, 50 a cuerpos de agua, 100 a la agricultura, 80 de equipamiento urbano y 150 a los asentamientos humanos.

La delimitación de los sitios de entrenamiento se llevó a cabo en base a la regla general de Jensen (1996), que consistió en elegir, por lo menos, 10 veces el número de bandas utilizadas en la elaboración de los parámetros de clasificación. Además, para calibrar el clasificador se utilizaron los campos de entrenamiento y posteriormente, éstos se representaron gráficamente, obteniendo como resultado las firmas espectrales para cada una de las clases.

Clasificación

Se realizó la clasificación supervisada de las imágenes de satélite para los años 1986 y 2018 con base en la aplicación del método o algoritmo de máxima verosimilitud o también conocido como máxima probabilidad (Max Like). Dicho algoritmo considera los parámetros de clasificación previamente calculados (clasificador calibrado) para etiquetar cada píxel de la imagen con una de las categorías establecidas (Lira, 2010). A partir de la aplicación de este método se generaron los mapas de uso de suelo y vegetación de los años 1986 y 2018 de Toluca de Lerdo.

Los métodos, técnicas y procedimientos establecidos en las fases metodológicas de preclasificación y clasificación fueron implementados en la herramienta geotecnológica ArcGis 10.2.

Validación de mapas de uso de suelo y vegetación (1986 y 2018)

La confiabilidad temática permite valorar el grado de correspondencia de un mapa con la realidad (Stehman & Czaplewsky, 1998). Los mapas de uso de suelo y vegetación derivados de la clasificación de imágenes de satélite de los años 1986 y 2018, fueron sometidos al proceso de evaluación de la confiabilidad temática para conocer su grado de certeza y fiabilidad (Mas *et al.*, 2003). Esto se realizó a partir de las distintas etapas que comprenden al proceso de validación temática. A continuación, se describe cada una de las etapas.

1.- Diseño del muestreo. Esta fase consta de tres procesos:

1.1.- La unidad de muestreo que se utilizó fue el punto;

1.2.- El método de muestreo aplicado fue el aleatorio estratificado, considerando que posibilita tener parte del control sobre la selección y distribución de los sitios de muestreo y garantizando que no se sobremuestren las clases con mayor superficie en relación a las de menor proporción (Card, 1982; Mas *et al.*, 2003; Mas y Couturier, 2011) y;

1.3.- El tamaño de la muestra se fundamentó desde dos tendencias; la primera con base en los parámetros establecidos por Mas y Couturier (2011), donde establecen que para obtener una fiabilidad global estimada para el mapa de 80% y un medio intervalo de confianza de 5% se deben aplicar 246 sitios de verificación (marcados con recuadro amarillo) y; la segunda en base a lo determinado por Congalton (1988, 1991), que sugiere verificar por lo menos 50 sitios por categoría. Por lo cual, se registraron 250 puntos de muestreo para el mapa correspondiente al año 1986. Para el mapa de 2018 se muestrearon 250 puntos nuevamente (Tabla N° 2).

Tabla 2. Tamaño de la muestra por categoría (puntos de muestreo) en función de p y *

Medio intervalo de confianza que se pretende obtener (*)	Porcentaje de fiabilidad que se pretende alcanzar (p)				
	90	80	70	60	50
2.5	553	983	1291	1475	1537
5.0	138	246	323	369	384
10.0	35	61	81	92	96

Fuente: Mas y Couturier (2011)

2.- Evaluación de los sitios de verificación. En esta etapa se relacionaron los puntos de muestreo anteriormente registrados, con una categoría de la leyenda que se localiza en los mapas de uso de suelo y vegetación. Para la evaluación de los sitios de verificación correspondientes a los años 1986 y 2018 se utilizaron los insumos ocupados previamente para la elaboración de los mapas. Para esto, fue indispensable recurrir a un especialista (externo) en la temática, con el fin de evaluar los sitios de muestreo mediante el juicio de experto y la interpretación (Congalton *et al.*, 1998).

3.- Análisis de los datos. Este proceso se fundamentó mediante la elaboración de la matriz de confusión o matriz de error (una para cada año, 1986 y 2018), que permite confrontar la información de los sitios de verificación con las categorías clasificadas en los mapas de USV. Esta matriz se integra por filas que muestran las clases de referencia, mientras que las columnas representan las categorías del mapa. La diagonal (sombreada en amarillo) integra el número puntos de verificación para los cuales hay correlación entre los datos de referencia y las clases del mapa, por su parte los marginales expresan errores de asignación (Mas *et al.*, 2003; Mas y Couturier, 2011) [Tabla N° 3].

Tabla 3. Matriz de confusión o de error

Verdad terreno (Clases de referencia= i)	Verdad imagen (Categorías del mapa = j)				
	j_1	j_2	...	j_q	Total
i_1	$i_1 j_1$	$i_1 j_2$	...	$i_1 j_q$	i_{1+}
i_2	$i_2 j_1$	$i_2 j_2$	...	$i_2 j_q$	i_{2+}
...
i_q	$i_q j_1$	$i_q j_2$	...	$i_q j_q$	i_{q+}
Total	$+j_1$	$+j_2$	...	$+j_q$	$\sum i_+$ $\sum j$

Donde:

ij = Representa el número de puntos (superficie) correctamente clasificados de cada categoría o clase.

i_{1+} = Es la suma de los puntos (superficie) correspondientes a la clase de referencia i_1 .

$+j_1$ = Corresponde a la suma de los puntos (superficie) de la categoría del mapa j_1 .

$\sum j$ o $\sum i_+$ = Es el total de la suma de los puntos de las clases de referencia ($\sum P_{i+}$), o bien, el total de la suma de los puntos correspondientes a las categorías del mapa ($\sum P_{+j}$).

Fuente: Camacho *et al.* (2015)

Obtenidos los datos de la matriz de confusión o de error se determinaron y calcularon los índices de fiabilidad y el medio - intervalo de confianza para cada mapa, considerando una fiabilidad estimada de 80% (Stehman & Czaplewski, 1998) [Tabla N° 4].

Precedente a la ejecución de los índices de fiabilidad y el medio – intervalo de confianza, se realizó la corrección de las matrices de error, consecuente al método de muestreo aplicado en la validación siendo el aleatorio estratificado. Lo anterior, se debe a que, en dicho muestreo el número de sitios por categoría no es proporcional al área cubierta por cada categoría, por lo cual, el valor obtenido no debe ser interpretado de esta manera (Mas *et al.*, 2003).

La corrección de las matrices de error se realizó a través del método establecido por Card (1982), basándose en ponderar el número de sitios de verificación en relación a la superficie de cada categoría representada en el mapa. Mediante la aplicación de este método se construyeron matrices de confusión expresadas en proporción (adquieren el mismo formato que la Tabla N° 3) y con base en los datos que integran a cada una de éstas se calculó la proporción y la superficie correspondiente a cada una de las categorías de análisis.

Tabla 4. Ecuaciones para obtener índices de fiabilidad y medio–intervalo de confianza.

Indicador	Fórmula
Confiabilidad global o exactitud general	$P_c = (\sum P_{ij} / \sum P_{+j} \text{ o } P_{i+}) * 100$
Medio – intervalo de confianza	$B = z_{\alpha/2} \sqrt{p(1-p) / n}$
Error de comisión	$E_c = (1 - (P_{ij} / P_{+j})) * 100$
Error de omisión	$(E_o) = (1 - (P_{ij} / P_{i+})) * 100$
Confiabilidad del usuario	$C_u = (P_{ij} / P_{+j}) * 100$
Confiabilidad del productor	$C_p = (P_{ij} / P_{i+}) * 100$

Fuente: Elaboración propia con base en Camacho *et al.* (2015); Mas *et al.* (2003); Mas y Couturier (2011); Stehman y Czaplewski (1998).

Obtención de los mapas de cobertura y uso de suelo

Los mapas de uso de suelo y vegetación de la Ciudad de Toluca para los años 1986 y 2018 fueron obtenidos mediante la clasificación supervisada de imágenes de satélite (1986 y 2018) con la herramienta Arc Gis 10.2 y mediante la aplicación y validación cartográfica (Mas y Couturier, 2011) realizada a dichos mapas.

Tasas anuales de cambio

Para estudiar los procesos de cambio acontecidos en las coberturas y usos del suelo de Toluca de Lerdo, se determinaron tasas anuales de cambio que comprende el periodo de 1986 a 2018; esto a partir de las superficies correspondientes a las coberturas y usos del suelo que se encuentran representadas espacialmente en los mapas de la Ciudad de Toluca. También se integró la superficie corregida de cada una de las categorías de análisis obtenida mediante el método de Card (1982). Es así que las tasas de cambio fueron determinadas en base a la ecuación de la FAO (1996):

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

Donde:

t = Tasa de cambio (se produce por 100 para obtenerse en porcentaje)

S= Superficie de la misma cobertura/uso del suelo (S₁ corresponde a la fecha 1 y S₂ pertenece al tiempo 2)

n = Número de años transcurridos entre las dos fechas (De 1986-2018, transcurrieron 32 años)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Validación de mapas de uso de suelo y vegetación

La evaluación de la fiabilidad de los mapas de uso de suelo y vegetación se realizó para los años 1986 y 2018, en cuanto a la matriz de error o confusión se muestran los siguientes resultados:

- a) Para el mapa del año de 1986 de los 250 sitios de verificación, 238 corresponden a las categorías del mapa clasificado para dicho año, es decir, el bosque obtuvo 46 sitios correctos de 50, los cuerpos de agua un total de 50, la agricultura y terrenos en descanso 46 puntos, el equipamiento urbano 50 y la zona habitacional y viviendas 46 sitios (Tabla No. 5a) y; b) en cuanto al mapa del año 2018 de los 250 puntos de muestreo, 245 representan a las categorías del mapa, es decir, el bosque obtuvo 48 sitios correctos, la agricultura 47 y las coberturas restantes obtuvieron un total de 50 sitios.

Tabla 5. Matriz de error o confusión (1986 y 2018).

a) Año 1986		Verdad imagen (Clases del mapa)					
		Bosque	Cuerpos de agua	Agricultura y terrenos en descanso	Equipamiento urbano	Zona habitacional y viviendas	Total verdad terreno
Verdad terreno (Clases de referencia)	Bosque	46	0	3	0	1	50
	Cuerpos de agua	0	50	0	0	0	50
	Agricultura y terrenos en descanso	2	0	46	0	2	50
	Equipamiento urbano	0	0	0	50	0	50
	Zona habitacional y viviendas	1	0	3	0	46	50
Total verdad imagen		49	50	52	50	49	250
b) Año 2018		Verdad imagen (Clases del mapa)					
		Bosque	Cuerpos de agua	Agricultura y terrenos en descanso	Equipamiento urbano	Zona habitacional y viviendas	Total verdad terreno
Verdad terreno (Clases de referencia)	Bosque	48	0	2	0	0	50
	Cuerpos de agua	0	50	0	0	0	50
	Agricultura y terrenos en descanso	3	0	47	0	0	50
	Equipamiento urbano	0	0	0	50	0	50
	Zona habitacional y viviendas	0	0	0	0	50	50
Total verdad imagen		51	50	49	50	50	250

Fuente: Elaboración propia

La Tabla N° 6 representa los resultados derivados en proporción del número total de sitios de verificación, es decir, el porcentaje de las categorías clasificadas. De acuerdo con Mas y Couturier (2011), dichos valores se muestran en relación con los puntos de muestreo obtenidos, realizándose los ajustes necesarios para los siguientes años:

a) Con relación al mapa del año 1986 se observan las siguientes proporciones: 6.18% de bosque, 0.186% de cuerpos de agua, 67.715% de agricultura, 2.077% de equipamiento urbano y 23.843% de zona habitacional (Tabla N° 6a).

b) Para el mapa del año 2018 se muestran las proporciones de: 3.268% de bosque, 0.086% de cuerpos de agua, 28.971% de agricultura, 6.772% de equipamiento urbano y 60.903% de zona habitacional (Tabla N° 6b).

Tabla 6. Matriz de confusión expresada en proporción (1986 y 2018).

a) Año 1986		Verdad imagen (Clases del mapa)					
		Bosque	Cuerpos de agua	Agricultura y terrenos en descanso	Equipamiento urbano	Zona habitacional y viviendas	Total verdad terreno
Verdad terreno (Clases de referencia)	Bosque	0.19938	0.00000	0.00060	0.00000	0.00002	0.20000
	Cuerpos de agua	0.00000	0.20000	0.00000	0.00000	0.00000	0.20000
	Agricultura y terrenos en descanso	0.00008	0.00000	0.19979	0.00000	0.00012	0.20000
	Equipamiento urbano	0.00000	0.00000	0.00000	0.20000	0.00000	0.20000
	Zona habitacional y viviendas	0.00001	0.00000	0.00028	0.00000	0.19971	0.20000
Total verdad imagen		0.19948	0.20000	0.20067	0.20000	0.19985	1.00000
Proporción representada en el mapa		0.06180	0.00186	0.67715	0.02077	0.23843	1.00000
b) Año 2018		Verdad imagen (Clases del mapa)					
		Bosque	Cuerpos de agua	Agricultura y terrenos en descanso	Equipamiento urbano	Zona habitacional y viviendas	Total verdad terreno
Verdad terreno (Clases de referencia)	Bosque	0.19970	0.00000	0.00030	0.00000	0.00000	0.20000
	Cuerpos de agua	0.00000	0.20000	0.00000	0.00000	0.00000	0.20000
	Agricultura y terrenos en descanso	0.00004	0.00000	0.19996	0.00000	0.00000	0.20000
	Equipamiento urbano	0.00000	0.00000	0.00000	0.20000	0.00000	0.20000
	Zona habitacional y viviendas	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.20000	0.20000
Total verdad imagen		0.19975	0.20000	0.20025	0.20000	0.20000	1.00000
Proporción representada en el mapa		0.03268	0.00086	0.28971	0.06772	0.60903	1.00000

Fuente: Elaboración propia

La Tabla N° 7 representa los valores en proporción y corregidos de acuerdo con Card (1982), para los mapas de los siguientes años:

a) Para el año de 1986 las proporciones corregidas son las siguientes: 6.38% de bosque, 0.186% de cuerpos de agua, 67.435% de agricultura, 2.077% de equipamiento urbano y 23.921% de zona habitacional (Tabla N° 7a).

b) Para el año 2018 se muestran las proporciones corregidas de: 3.311% de bosque, 0.086% de cuerpos de agua, 28.928% de agricultura, 6.772% de equipamiento urbano y 60.903% de zona habitacional (Tabla N° 7b).

Tabla 7. Matriz de confusión expresada en proporción y corregida (Card, 1982)

a) Año 1986		Verdad imagen (Clases del mapa)					
		Bosque	Cuerpos de agua	Agricultura y terrenos en descanso	Equipamiento urbano	Zona habitacional y viviendas	Total verdad terreno
Verdad terreno (Clases de referencia)	Bosque	0.06177	0.00000	0.00202	0.00000	0.00003	0.06382
	Cuerpos de agua	0.00000	0.00186	0.00000	0.00000	0.00000	0.00186
	Agricultura y terrenos en descanso	0.00003	0.00000	0.67418	0.00000	0.00014	0.67435
	Equipamiento urbano	0.00000	0.00000	0.00000	0.02077	0.00000	0.02077
	Zona habitacional y viviendas	0.00000	0.00000	0.00095	0.00000	0.23826	0.23921
Total verdad imagen		0.06180	0.00186	0.67715	0.02077	0.23843	1.00000
Proporción representada en el mapa		0.06180	0.00186	0.67715	0.02077	0.23843	1.00000
b) Año 2018		Verdad imagen (Clases del mapa)					
		Bosque	Cuerpos de agua	Agricultura y terrenos en descanso	Equipamiento urbano	Zona habitacional y viviendas	Total verdad terreno
Verdad terreno (Clases de referencia)	Bosque	0.03267	0.00000	0.000344	0.00000	0.00000	0.03311
	Cuerpos de agua	0.00000	0.00086	0.00000	0.00000	0.00000	0.00086
	Agricultura y terrenos en descanso	0.00001	0.00000	0.28927	0.00000	0.00000	0.28928
	Equipamiento urbano	0.00000	0.00000	0.00000	0.06772	0.00000	0.06772
	Zona habitacional y viviendas	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.60903	0.60903
Total verdad imagen		0.03268	0.00086	0.28971	0.06772	0.60903	1.00000
Proporción representada en el mapa		0.03268	0.00086	0.28971	0.06772	0.60903	1.00000

Fuente: Elaboración propia

La Tabla N° 8 representa los resultados obtenidos de los índices de confiabilidad e intervalos de confianza de los mapas interpretados para los años 1986 y 2018. En cuanto al mapa del año 1986 (Tabla N° 8a) los resultados expresan que:

a) Las categorías de cuerpos de agua y equipamiento urbano, presentaron una confiabilidad del usuario de 100% y 0% de error de comisión, por su parte, el bosque, la agricultura y la zona habitacional representaron una confiabilidad del usuario de 99% y un error de comisión de 1%.

b) Con lo que respecta a la confiabilidad del productor, las clases de cuerpos de agua y equipamiento urbano obtuvieron 100% (con 0% de error por omisión), por su parte el bosque presenta un porcentaje de 97% de confiabilidad (por un error de 3%), además la agricultura y la zona habitacional presentaron una fiabilidad de 99% (y error de 1%).

Finalmente, la confiabilidad global obtenida para el mapa del año 1986 corresponde a 99%, valor que rebasa el porcentaje límite permisible para validar un producto cartográfico que corresponde a 80% (Lesschen *et al.*, 2005; Mas *et al.*, 2003).

Tabla 8a. Coeficientes de los índices de confiabilidad e intervalos de confianza.

a) Año 1986	Categorías o clases en porcentaje (%)					Confiabilidad global (%)	Intervalo de confianza de la confiabilidad global (%)
	Bosque	Cuerpos de agua	Agricultura y terrenos en descanso	Equipamiento urbano	Zona habitacional y viviendas		
Confiabilidad del usuario	99	100	99	100	99	99.0	0.014
Error de comisión	1	0	1	0	1		
Intervalo de confianza de la confiabilidad del usuario	0.61	0	1.83	0	0.73		
Confiabilidad del productor	97	100	99	100	99		
Error de omisión	3	0	1	0	1		
Intervalo de confianza de la confiabilidad del productor	0.05	0	0.001	0	0.017		

Fuente: Elaboración propia

Respecto al mapa del año 2018 (Tabla N° 8b), los porcentajes referentes a los índices de confiabilidad e intervalos de confianza determinan que:

a) Las categorías de cuerpos de agua y equipamiento urbano y zona habitacional, presentaron una confiabilidad del usuario de 100% y 0% de error de comisión, por su parte, el bosque y la agricultura representaron una confiabilidad del usuario de 98% y un error de comisión de 2%

b) Con lo que corresponde a la confiabilidad del productor, las clases de cuerpos de agua, equipamiento urbano y zona habitacional obtuvieron 100% (con 0% de error por omisión), por su parte el bosque presenta un porcentaje de 98% de confiabilidad (por un error de 2%) y la agricultura una fiabilidad de 99% (y error de 1%).

La confiabilidad global obtenida para el mapa del año 2018 corresponde a 99.3%, valor que rebasa el porcentaje límite permisible para validar un mapa que corresponde a 80% (Franco *et al.*, 2006; Mas y Couturier, 2011).

Tabla 8b. Coeficientes de los índices de confiabilidad e intervalos de confianza.

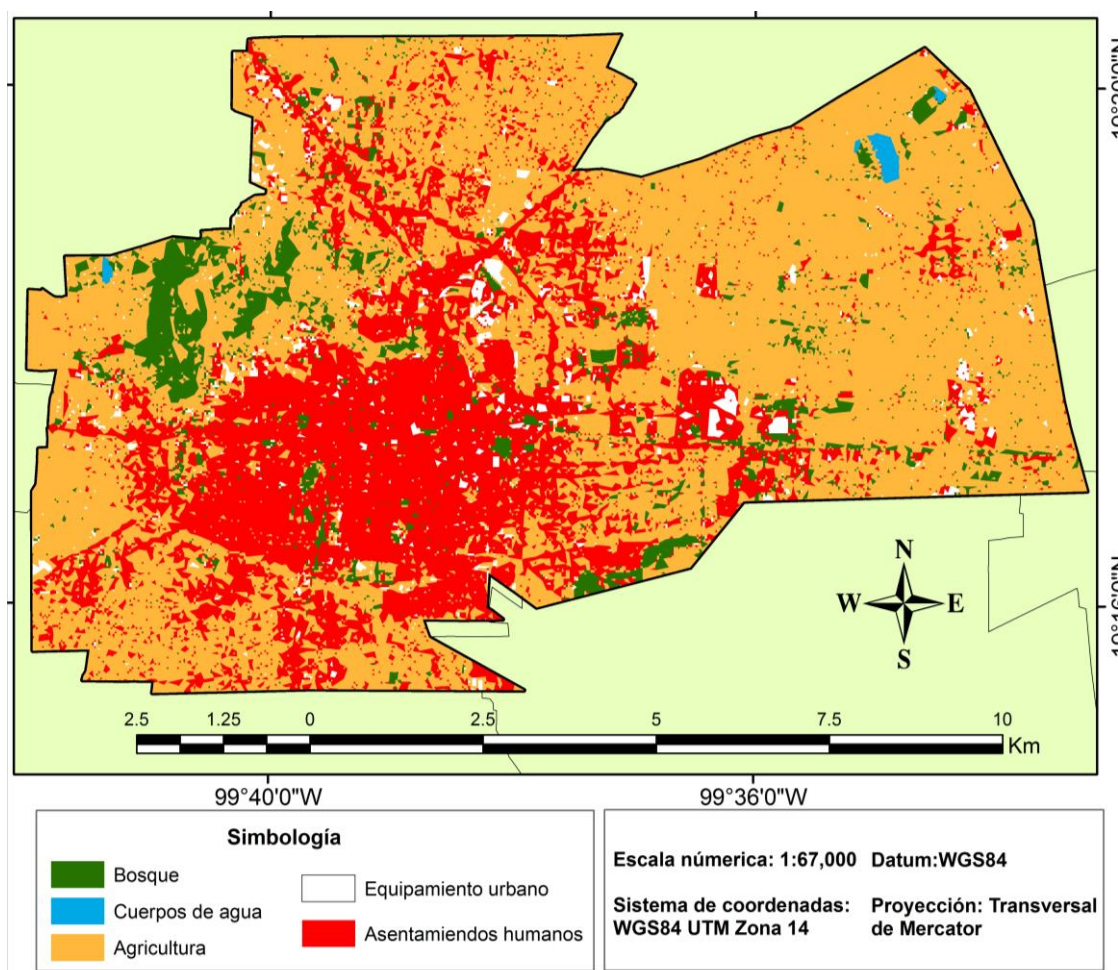
b) Año 2018	Categorías o clases en porcentaje (%)					Confiabilidad global (%)	Intervalo de confianza de la confiabilidad global (%)
	Bosque	Cuerpos de agua	Agricultura y terrenos en descanso	Equipamiento urbano	Zona habitacional y viviendas		
Confiabilidad del usuario	98	100	99	100	100	99.3	0.154
Error de comisión	2	0	1	0	0		
Intervalo de confianza de la confiabilidad del usuario	0.43	0	1.08	0	0		
Confiabilidad del productor	98	100	99	100	100		
Error de omisión	2	0	1	0	0		
Intervalo de confianza de la confiabilidad del productor	0.03	0	0.001	0	0		

Fuente: Elaboración propia

Mapas de cobertura y uso de suelo

Se obtuvieron dos mapas de uso de suelo y vegetación de Toluca de Lerdo de los años 1986 y 2018. Para el primer año, la leyenda del mapa corresponde a cinco categorías: bosque con una superficie de 898.66 ha, cuerpos de agua con 27.17 ha, agricultura y terrenos en descanso 9876.78 ha, equipamiento urbano 302.74 ha y zona habitacional con 3473.40 ha, sumando un total de 14578.76 ha (Figura N° 2 y Tabla N° 9). La fiabilidad global de este mapa fue de 90.0%, valor que rebasa el porcentaje mínimo permitido de 80 % para la validación cartográfica (Mas y Couturier, 2011).

Figura 2. Mapa de uso de suelo y vegetación de Toluca de Lerdo (1986).



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9. Superficie de las coberturas y uso de suelo de Toluca de Lerdo (1986).

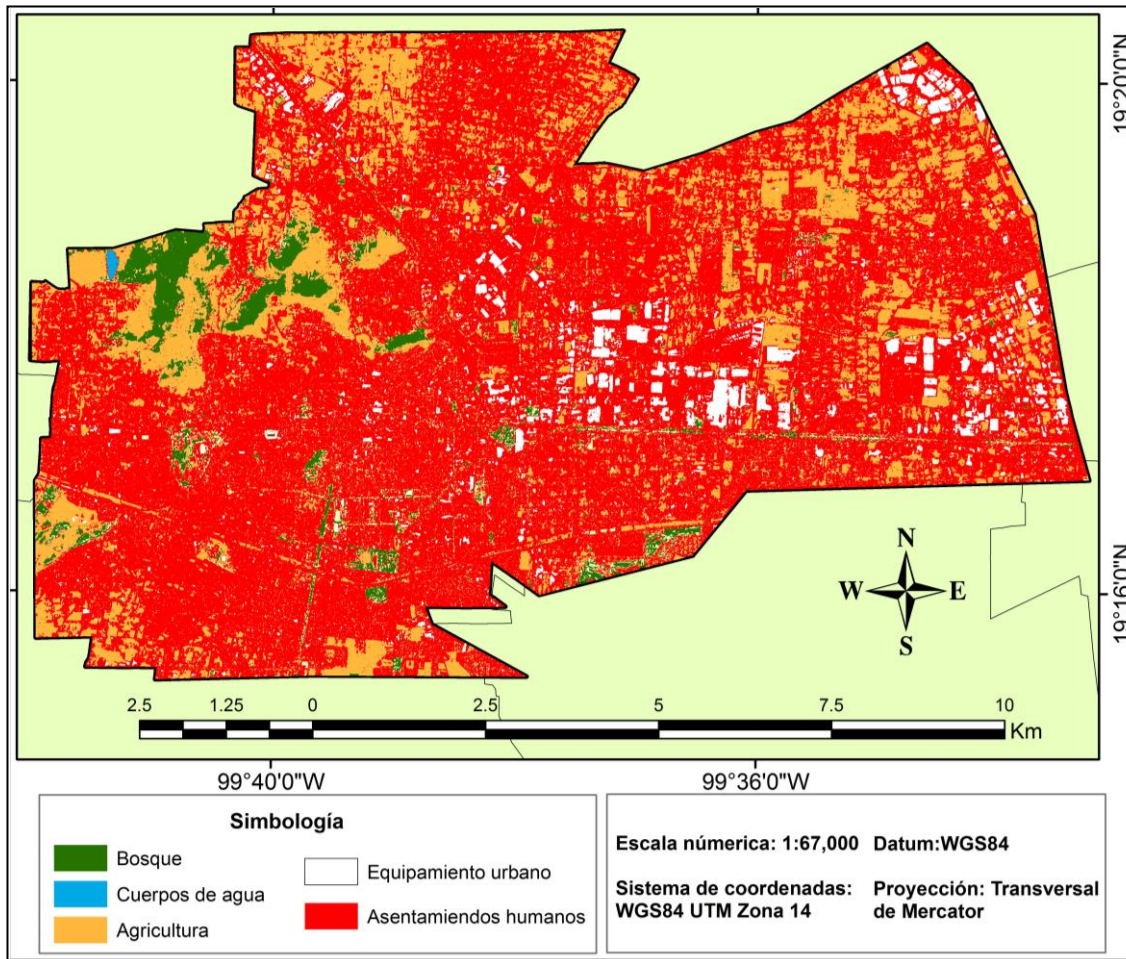
Cobertura\Año	Superficie año 1986
Bosque	898.666598
Cuerpos de agua	27.17
Agricultura y terrenos en descanso	9876.78174
Equipamiento urbano	302.74
Zona habitacional y viviendas	3473.40166
Total (hectáreas)	14578.76

Fuente: Elaboración propia

Con respecto al mapa del año 2018, la leyenda del mapa representa cinco categorías: bosque con una superficie de 475.90 ha, cuerpos de agua con 12.49 ha, agricultura y terrenos en descanso 4224.25 ha, equipamiento urbano 987.24 ha y zona habitacional con 8878.85.70 ha, sumando un total de 14578.76 ha (Figura No. 3 y Tabla No. 10). La confiabilidad global de este producto es de 90.3%, valor que rebasa el porcentaje mínimo permisible (80 %) para la validación cartográfica (Mas & Couturier, 2011).

Además, todas las superficies obtenidas para ambos mapas (1986 y 2018) están ajustadas y validadas con base en Card (1982) [Tabla No. 11].

Figura 3. Mapa de uso de suelo y vegetación de Toluca de Lerdo (2018).



Fuente: Elaboración propia

Tabla 10. Superficie de las coberturas y uso de suelo de Toluca de Lerdo (2018).

Cobertura\Año	Superficie año 2018
Bosque	475.90284
Cuerpos de agua	
Agricultura y terrenos en descanso	4224.25909
Equipamiento urbano	987.245977
Zona habitacional y viviendas	8878.85997
Total (héctareas)	14578.76

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11. Probabilidades de asignación de las categorías mapeadas (coeficientes de la proporción y superficie de las categorías resultado del ajuste de los errores de clasificación).

a) Año 1986		Probabilidades							
		Bosque	Cuerpos de agua	Agricultura y terrenos en descanso	Equipamiento urbano	Zona habitacional y viviendas	Superficie Ha	Proporción corregida	Superficie corregida Ha
Sitios de muestreo (Clases de referencia)	Bosque	0.99690	0.00000	0.00150	0.00000	0.00010	901.03000	0.06382	898.66660
	Cuerpos de agua	0.00000	1.00000	0.00000	0.00000	0.00000	27.17000	0.00186	27.17000
	Agricultura y terrenos en descanso	0.00042	0.00000	0.99896	0.00000	0.00061	9871.94000	0.67435	9876.78174
	Equipamiento urbano	0.00000	0.00000	0.00000	1.00000	0.00000	302.74000	0.02077	302.74000
	Zona habitacional y viviendas	0.00005	0.00000	0.00014	0.00000	0.99855	3475.95000	0.23921	3473.40166
Proporción representada en el mapa		0.06180	0.00186	0.67715	0.02077	0.23843	14578.76000	1.00000	14578.76000
b) Año 2018									
Sitios de muestreo (Clases de referencia)	Bosque	0.99851	0.00000	0.00149	0.00000	0.00000	476.50677	0.03311	475.90284
	Cuerpos de agua	0.00000	1.00000	0.00000	0.00000	0.00000	12.492131	0.00086	12.49213
	Agricultura y terrenos en descanso	0.00002	0.00000	0.99978	0.00000	0.00000	4223.65515	0.28928	4224.25909
	Equipamiento urbano	0.00000	0.00000	0.00000	1.00000	0.00000	987.24598	0.06772	987.245977
	Zona habitacional y viviendas	0.00000	0.00600	0.00000	0.00000	1.00000	8878.85997	0.60903	8878.85997
Proporción representada en el mapa		0.03268	0.00086	0.28971	0.06772	0.60903	14578.76000	1.00000	14578.76000

Fuente: Elaboración propia.

Tasas anuales de cambio

Para el periodo 1986-2018, en Toluca de Lerdo se registraron tasas anuales de cambio que representan un proceso de crecimiento en relación a la extensión de ciertas coberturas y usos del suelo, dicho incremento se presenta en el caso del equipamiento urbano y la zona habitacional (viviendas) que muestran tasas anuales de cambio de 7.07% y 4.86%, respectivamente. Además, existen categorías que demuestran un proceso de reducción en cuanto a su superficie, como el bosque, los cuerpos de agua y la agricultura (terrenos en descanso) que registraron tasas anuales de cambio de -1.47%, -1.69% y 1.79%, respectivamente (Tabla N° 12).

Dichas tasas de cambio representan meramente un crecimiento urbano o un proceso de urbanización, en comparación con el trabajo de Camacho *et al.* (2017), en el cual, se muestran tasas de crecimiento relacionadas con las actividades agrícolas, principalmente hacia una agricultura tecnificada controlada. Ambos procesos de transformación generan impactos en los diferentes componentes del ambiente, pero sobre todo representan la diversidad de cambios que pueden presentarse en los diferentes espacios.

También la tabla N° 12 muestra los cambios en Toluca de Lerdo en términos del incremento y disminución del área de cada cobertura y uso del suelo que caracterizan a este territorio. En términos absolutos, en el año 1986 el bosque tenía una superficie de 889.66 ha, para el año 2018 se observa una superficie de 475.90 ha, resultado de un

proceso de deforestación. Otra de las categorías que presenta pérdidas fue la de cuerpos de agua, pues paso de tener un área de 27.1 ha a 12.49 ha (en el mismo periodo). Por su parte, la cobertura que obtuvo la mayor reducción de superficie fue la agricultura, debido a que en el año 1986 contenía 9876.78 ha y para el año 2018 se redujo a 4224.25 ha, presentando una pérdida de más del 50% de su área. En cuanto a las clases que obtuvieron las mayores ganancias de extensión territorial fueron, el equipamiento urbano, ya que en el año de 1986 presentaba una cobertura de 302.74 ha y para el año 2018 se incrementó a 987.24 ha y la zona habitacional, misma que presenta las mayores ganancias, ya que paso de contener 3473.40 ha a 8878.85 ha (en dicho periodo). Lo que muestra un proceso adverso al presentado en el estudio de Camacho *et al.* (2017), en el cual la agricultura fue la cobertura con mayores ganancias de superficie, lo anterior, dependerá de las condiciones físico-naturales y socioeconómicas de cada territorio.

Tabla 12. Superficies y tasas anuales de cambio de las coberturas y uso de suelo de Toluca de Lerdo.

Cobertura\Año	Superficie 1986	Superficie 2018	Tasa anual
Bosque	898.666598	475.90	-1.47
Cuerpos de agua	27.17	12.49	-1.69
Agricultura y terrenos en descanso	9876.78174	4224.25	-1.79
Equipamiento urbano	302.74	987.24	7.07
Zona habitacional y viviendas	3473.40166	8878.85	4.86
Total (hectáreas)	14578.76	14578.76	

Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

En este estudio, el método de clasificación que se aplicó fue el algoritmo de máxima verosimilitud o también conocido como máxima probabilidad (Max Like), lo cual permitió disminuir los errores cartográficos que se producen durante el proceso de clasificación (imágenes de satélite de los años 1986 y 2018), adquiriendo altos niveles de confiabilidad, siendo que para esta investigación los valores obtenidos fueron 90% de fiabilidad global para cada uno de los mapas clasificados.

En un periodo de 32 años, es decir, 1986-2018 se observa que la localidad Toluca de Lerdo se encuentra inmersa en un proceso de crecimiento urbano, fundamentalmente por el desarrollo de equipamiento urbano (como zonas industriales e implementación de servicios, comercios al por menor, comercios al por mayor y plazas comerciales) y expansión de zonas habitacionales, residenciales y viviendas. Lo anterior, se asocia a que el bosque y la agricultura son las coberturas que presentaron las mayores pérdidas de superficie durante dicho periodo, mientras que el equipamiento urbano y las zonas habitacionales integraron las mayores ganancias en referencia a extensión territorial en el mismo periodo de tiempo. Lo que muestra principalmente que, se generó un proceso de urbanización o desarrollo urbano.

Lo anterior, se asocia con base en los resultados, puesto que durante el periodo de estudio (1986-2018) se observó un proceso de urbanización asociado a la expansión y

desarrollo de actividades industriales, comerciales y crecimiento demográfico. Evidencia de ello es que la categoría de equipamiento urbano en el año 1986 contenía una superficie de 302.74 ha y para el año 2018 incrementó su extensión a 987.24 ha. Por su parte, la zona habitacional y viviendas en el primer año su área correspondía a 3473.4 ha y para el segundo año se expandió a 8878.85 ha. En consecuencia la cobertura que obtuvo las mayores pérdidas fue la agricultura, pues paso de contener 9876.78 ha a 4224.25 ha en el mismo periodo de tiempo (1986-2018).

Con base en el trabajo de campo (recorridos *in situ* y aplicación de la observación directa) realizado en la localidad de Toluca de Lerdo, se puede determinar que la superficie que corresponde a las categorías de equipamiento urbano y zona habitacional, se han extendido y sigue incrementándose considerablemente sobre la agricultura y terrenos en descanso, fungiendo como principales factores los aspectos socioeconómicos, puesto que hay una gran oferta de empleos, comercios y servicios, lo que propicia principalmente la llegada o migración de personas en busca de empleos y servicios educativos, lo que provoca la implementación de más zonas habitacionales y por índole el desarrollo de equipamiento urbano.

El desarrollo de investigaciones asociados a los cambios de cobertura y uso de suelo, son de gran relevancia con relación a las problemáticas ambientales que acontecen en todo el mundo y en todos los niveles (local, nacional, regional y global). Puesto que, en la localidad de Toluca de Lerdo hay presencia de diferentes impactos ambientales (sobreexplotación de mantos acuíferos, hundimientos del terreno, contaminación de aire, suelo y agua, entre otros) asociados principalmente al crecimiento y desarrollo urbano. Por lo cual, la importancia de caracterizar las coberturas y uso de suelo en la Ciudad de Toluca para que los diferentes actores sociales desarrollen e implementen estrategias que coadyuven al desarrollo sustentable del territorio.

BIBLIOGRAFÍA

- Camacho, J. M., Juan, J. I., Pineda, N. B., Cadena, E. G., Bravo, L. C. y Sánchez, M. (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. doi: 10.21829/myb.2015.211435.
- Camacho, R., Balderas, P., Camacho, J.M., Morales, C. y Sánchez, M. (2017). Variabilidad de la temperatura ambiente en una zona de transición ecológica: factores y procesos que determinan su comportamiento. *Geografía y Sistemas de Información Geográfica (GeoSIG)*, 9 (9), 104-123.
- Candela, L., Tamoh, K., Olivares, G., Gómez, M. y Valdés, J. (2015). Efectos del cambio climático y usos del suelo sobre los recursos hídricos de la Cuenca del Río Tordera (Barcelona, España). *Aqua-LAC*, 7(1), 1-10
- Card, H. (1982). Using known map category marginal frequencies to improve estimates of thematic map accuracy. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 48(3), 431-439.
- Congalton, R. (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(1), 35-46. doi: 10.1016/0034-4257(91)90048-b.
- Congalton, M., Martin, M., Newman, S. y Aber, J. (1998). Determining forest species composition using high spectral resolution remote sensing data. *Remote Sensing of the Environment*, 65(3), 249–254. doi: 10.1016/s0034-4257(98)00035-2.
- Franco, S., Regil, H. y Ordóñez, J. (2006). Dinámica de perturbación-recuperación de las zonas forestales en el Parque Nacional Nevado de Toluca. *Madera y Bosques*, 12(1), 17-28. doi: 10.21829/myb.2006.1211247.
- Hernández, V. y Flores, N. (2013). Propuesta para calcular el daño económico en predios urbanos afectados por fallas geológicas asociadas a subsidencia diferencial. Federación de Colegios de Valuadores.
- Geist, H., McConnell, W., Lambin, E., Moran, E., Alves, D. y Rudel, T. (2006). *Causes and Trajectories of Land-Use/Cover Change*. In E. F. Lambin & H. Geist (Eds.), *Land-Use and Land-Cover Change, Local processes and global impacts* (pp. 41-70). Germany: Springer-Verlag Berlin, Heidelberg.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2018). Marco Geoestadístico Nacional. Obtenida el 29 de febrero de 2018 de http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geoestadistica/m_geoestadistico.aspx
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2009). Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Obtenida el 29 de febrero de 2017 de [file:///C:/Users/Ra%C3%BAI/Downloads/Informaci%C3%B3n%20Geogr%C3%A1fica-Toluca-INEGI%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/Ra%C3%BAI/Downloads/Informaci%C3%B3n%20Geogr%C3%A1fica-Toluca-INEGI%20(2).pdf)
- Lira, J. (2010). *Tratamiento digital de imágenes multiespectrales*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Lesschen, J., Verburg, P. y Staal, S. (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.
- López, B. (2012). *Cambios de uso de suelo y su impacto en el sistema acuífero del Valle de San Luis*. [Tesis de doctorado]. Posgrado en ciencias aplicadas. IPICYT. México.
- López, B., Ramos, J., Moran, J., Cardona, A. y Hernández, G. (2013). Origen de la calidad del agua del acuífero colgado y su relación con los cambios de uso de suelo en el Valle de San Luis Potosí. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 65(1):9-26.
- Mas, J. F., Díaz, J. y Pérez, A. (2003). Evaluación de la confiabilidad temática de mapas o de imágenes clasificadas: Una revisión. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 51, 53–72. Obtenido de <http://www.redalyc.org/pdf/569/56905105.pdf>
- Mas, J. y Couturier, S. (2011). *Evaluación de bases de datos cartográficas*. En F. Bautista (Ed.). *Técnicas de muestreo para manejadores de recursos naturales* (675-703). México, D.F., México: Instituto de Geografía-Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental-Universidad Nacional Autónoma de México.
- Mas, J. y Flamenco, A. (2011). Modelación de los cambios de coberturas/ uso del suelo en una región tropical de México. *GeoTropico*, 5(1), 1-24.
- Millington, A. y Alexander, R. (2000). *Vegetation mapping in the last three decades of the twentieth century*. En A. Millington y R. Alexander (Eds.), *Vegetation mapping* (321-331). Chichester, Inglaterra: John Wiley & Sons.
- Moscoso, C. (2006). *Expansión física y cambios de coberturas y usos de suelo en el Área Metropolitana de Valparaíso, V Región, Chile: período 1975-2004*. [Informe

Práctica Profesional, Laboratorio de Medio Ambiente y Territorio Departamento de Geografía]. Universidad de Chile.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO] (1996). *Forest resources assessment 1990. Survey of tropical forest cover and study of change processes*. (1a ed.). Roma, Italia: FAO Forestry Paper.

Pauleit, S., Ennos, R. y Goldingy, Y. (2005). *Modeling the environmental impacts of urban land use and land cover change: a study in Merseyside*, UK. In *Landscape and Urban Planning*. N° 71.

Pineda, N., Bosque, J., Gómez, M. y Franco, R. (2011). Análisis de los factores inductores de los cambios ocurridos en la superficie forestal del Estado de México en el período 1993-2000. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 56, 9-34.

Romero, H. (2006). *Análisis espacial del crecimiento urbano y de sus efectos sobre la sostenibilidad ambiental de las metrópolis y ciudades intermedias Chilenas*. [Tesis Doctoral]. España.

Solano, D., Cabral, E., Hernández, E., Wdowinski, S., DeMets, C., Salazar, L., Falorni, G. y Bohane, A. (2015). La relación de subsidencia del terreno InSAR-GPS y el abatimiento del nivel estático en pozos de la zona Metropolitana de la Ciudad de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 67(2): 273-283.

Stehman, S. y Czaplewski, R. (1998). Design and analysis for thematic map accuracy assessment: fundamental principles. *Remote Sensing of Environment*, 64(3), 331-344. doi: 10.1016/s0034-4257(98)00010-8

© Raúl Camacho Sanabria, Miguel Ángel Balderas Plata, José Manuel Camacho Sanabria, Víctor Manuel Hernández Madrigal.

Camacho Sanabria, R.; Balderas Plata, M.A.; Camacho Sanabria, J.M.; Hernández Madrigal, V.M. 2019. Caracterización de las coberturas terrestres y usos del suelo de la ciudad de Toluca. *Geografía y Sistemas de Información Geográfica (GeoSIG)*. 11(13) Sección I:68-88

On-line: www.revistageosig.wixsite.com/geosig

Recibido: 14 de agosto de 2018

Aceptado: 10 de noviembre de 2018