

Investigaciones Geográficas (Mx)
ISSN: 0188-4611
edito@igg.unam.mx
Instituto de Geografía
México

Cano Salinas, Laura; Rodríguez Laguna, Rodrigo; Valdez Lazalde, José René; Acevedo Sandoval, Otilio Arturo; Beltrán Hernández, Rosa Icela
Detección del crecimiento urbano en el estado de Hidalgo mediante imágenes Landsat
Investigaciones Geográficas (Mx), núm. 92, abril, 2017, pp. 1-10
Instituto de Geografía
Distrito Federal, México

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=56950566006>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

Detección del crecimiento urbano en el estado de Hidalgo mediante imágenes Landsat

Monitoring of urban growth in the state of Hidalgo using Landsat images

Laura Cano Salinas*, Rodrigo Rodríguez Laguna**, José René Valdez Lazalde***, Otilio Arturo Acevedo Sandoval**
y Rosa Icela Beltrán Hernández*

Recibido: 15/09/2015. Aprobado: 11/03/2016. Publicado en línea (versión e-print): 27/09/2016.

Resumen. La detección de la expansión urbana a través del procesamiento digital de imágenes satelitales proporciona información valiosa para el conocimiento de la dinámica del cambio de uso del suelo y su relación espacial con factores ambientales. Para aplicar o generar políticas efectivas de planeación del territorio es indispensable contar con un registro histórico de la distribución regional de los asentamientos humanos, elemento que en nuestro país es prácticamente nulo. Por esta razón, este texto tiene por objetivo determinar la tasa de crecimiento urbano durante el periodo 2000-2014 en el estado de Hidalgo, México, e identificar las zonas potenciales de expansión a partir de imágenes Landsat. Se utilizaron seis escenas Landsat para el análisis espacial de la cobertura urbana estatal y se evaluó su relación con el área de influencia vial. Como productos cartográficos se obtuvieron dos mapas: uno de distribución de la cobertura urbana y otro de los municipios con mayor expansión, cuyas áreas están localizadas en la región del Valle del Mezquital. Sin embargo, Mineral de la Reforma, Tetepango, Tizayuca y Pachuca de Soto se destacan por sus tasas de crecimiento durante el periodo de estudio: 183.44%, 102%, 94% y 68.5%, respectivamente. En total, la superficie urbana estatal aumentó 72.3 km² del 2000 al 2014 con una tasa de crecimiento promedio de 1.8% por año. Dicho crecimiento

se asoció con las áreas de influencia de infraestructura vial importante, como el Libramiento Arco Norte en Hidalgo. Por lo tanto, se considera al Valle del Mezquital y la Cuenca de México como regiones potenciales de expansión urbana en el estado.

Palabras clave: Expansión urbana, planeación territorial, infraestructura carretera, teledetección, Hidalgo.

Abstract. Detection of urban growth through digital processing of satellite images provides valuable information for understanding the dynamics of change of land use and its spatial relationship with environmental factors. To apply or create effective policies for land use planning is essential to have a historical record of the regional distribution of human centers and in our country this kind of geographical database is practically null. Although Mexico has an update and complete mapping of land use, this poses great challenges. Within this issue, the Hidalgo state destines half of its territory to agricultural use, nonetheless, ranks fifth nationally in road infrastructure density. In the last decade, the current highway "Arco Norte" that crosses the southern state has promoted economic development in several neighboring

* Área Académica de Química, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, carretera Pachuca-Tulancingo km 4.5, 42186, Mineral de la Reforma, Hidalgo. E-mail: lau.cano@yahoo.com.mx, rosa@uaeh.edu.mx

** Área Académica de Ciencias Agrícolas y Forestales, Instituto de Ciencias Agropecuarias, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Av. Universidad km 1, Ex-Hacienda de Aquetzalpa AP 32, 43600, Tulancingo, Hidalgo. E-mail: rodris71@yahoo.com

*** Postgrado Forestal, Campus Montecillo, Colegio de Postgraduados, carretera México-Texcoco km 36.5, 56230, Montecillo, Estado de México. E-mail: valdez@colpos.mx

municipalities and many of them were integrated into the Management Programme of the Metropolitan Area of the Valley of Mexico 2012.

Given this background, this paper is focused on the generation of geographic information for regional urban planning and the overall aim is to examine urban growth rate during the period 2000-2014 in the state of Hidalgo, Mexico and identify potential areas of expansion from Landsat images. The methodology was based on techniques of remote sensing and Geographical Information System (GIS). The inputs used were six Landsat scenes: three for 2000 year and three for 2014. Image processing was performed on ERDAS Imagine® 9.1 and the spatial analysis of urban coverage statewide on ArcGIS 10.0 by ESRI®. First, the radiometric correction was made and we obtained the urban polygons of the 2000 year through of supervised classification. The 2014 urban layer was digitized manually due to the spectral incompatibility between the bands of the Landsat sensor 5 and 7, and the Landsat sensor 8. Then, we build a road density map and the spatial relationship of the

urban centers with the road influence area was evaluated. For the year 2000, 103 urban polygons were mapped, whilst for 2014 were identified ten polygons more with a mapped minimum area of 24 ha. The main results indicated that in the state has increased 72.3 km² urban area from 2000 to 2014. This represents an average growth rate of 1.8% per year. The most widespread municipalities are located in the region of Valle del Mezquital, however, Mineral de la Reforma, Tetepango, Tizayuca and Pachuca showed growth rates of 183.44%, 102% 94% and 68.5% in fourteen years, respectively. According to the road map density, these municipalities are located in areas of greatest influence of infrastructure as the Arco Norte highway in the state. The above findings, lead us to conclude that the Mezquital Valley and the Basin of Mexico are potential areas of urban spreading and it is associated with road development in the Central Mexico.

Key words: Urban surface, land planning, road network, remote sensing.

INTRODUCCIÓN

El cambio de uso del suelo es considerado por el Sistema de Observación Climática Global (GCOS, por sus siglas en inglés) una de las 13 variables esenciales de influencia climática. Además, la ocupación del suelo ha sido estudiada como uno de los principales factores que impactan directamente sobre la biodiversidad, la fragmentación de ecosistemas y la prestación de servicios ambientales (Thorp *et al.*, 1997; Michelsen, 2007; Arriaga, 2009; Flores *et al.*, 2012).

De esta manera, el conocimiento de la distribución espacial de las coberturas de uso del suelo es indispensable para la formulación de políticas efectivas de ordenamiento territorial y de gestión sostenible de las actividades humanas a distintos niveles de organización (Mas *et al.*, 2009). Actualmente, las técnicas de percepción remota han facilitado los estudios de caracterización del territorio y permiten manipular grandes volúmenes de información geográfica (NASA, 2010; Hansen y Loveland, 2012).

En los últimos años la deforestación ha sido una de las actividades de cambio de uso del suelo más evaluadas en nuestro país (Mas *et al.*, 2009; FAO, 2010) y se ha observado que las entidades con mayor densidad de caminos son aquellas con menor proporción de superficie con vegetación natural remanente. En este sentido, cabe resaltar

que la densidad carretera para el estado de Hidalgo está estimada en el rango de 0.51-0.60 km/km² (SEMARNAT, 2012), ocupando así el quinto lugar a nivel nacional en infraestructura de autopistas, carreteras federales y estatales (SGM, 2011). No obstante, datos del *Anuario Estadístico de Hidalgo* (2012) del INEGI, muestran que alrededor de la mitad de la superficie del estado de Hidalgo se encuentra ocupada por la actividad agrícola.

Bajo este contexto, Santos *et al.* (2010) explican que la infraestructura vial más relevante de los últimos años, el denominado Arco Norte, ha dado gran impulso económico y urbano al área Metropolitana del Valle de México y la zona norte (Región de la Cuenca de México en el estado de Hidalgo) debido a que cruza transversalmente por las autopistas México-Querétaro y México-Pachuca en el estado de Hidalgo.

Ante este panorama, el presente trabajo de investigación se enfoca en el análisis estatal de la urbanización como indicador para la caracterización y ordenamiento territorial, y pretende dar a conocer la condición espacial de las zonas urbanas del estado de Hidalgo con el fin de determinar la relación del crecimiento urbano con el desarrollo de la infraestructura carretera, específicamente en el área de influencia norte de la Zona Metropolitana del Valle de México. Por lo tanto, el objetivo general de este estudio es determinar la tasa de expansión urbana durante el periodo 2000-2014 en el estado

de Hidalgo utilizando información satelital de los sensores Landsat para identificar las zonas y/o municipios potenciales de crecimiento.

METODOLOGÍA

Área de estudio

El estado de Hidalgo se ubica en la porción central de la República Mexicana (Figura 1) y forma parte de las provincias fisiográficas del Eje Neovolcánico Transversal y la Sierra Madre Oriental. Su extensión territorial de 20 813 km² y representa 1.1% de la superficie del país. La mayor parte del estado presenta clima seco y semiseco (39%) y templado subhúmedo (33%). En las regiones norte y noreste del estado se destacan los climas cálido húmedo (16%), cálido subhúmedo (6%) y templado húmedo (6%) (INEGI, 2012).

Procesamiento de imágenes

Los insumos utilizados para esta investigación fueron imágenes Landsat de los años 2000 y 2014 (Tabla 1) disponibles en la base de datos del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés) (<http://earthexplorer.usgs.gov/>), que incluyen el formato L1T (Nivel 1 de

Tabla 1. Características generales de las imágenes satelitales utilizadas en este estudio.

Path/Row	Sensor Landsat	Fecha
26/46	ETM+ 7	21/03/2000
26/45	TM 5	10/02/2000
27/46	TM 5	01/12/2000
26/46	OLI 8	31/01/2014
26/45	OLI 8	27/08/2014
27/46	OLI 8	19/09/2014

corrección del terreno), por lo que se encuentran geométricamente ortorectificadas.

Se adoptó la metodología general de Jensen (2005) para la extracción de información temática sobre cobertura de uso del suelo a partir de datos de sensores remotos. Por lo tanto, para el área de estudio se generaron un par de mosaicos de imágenes de los años 2000 y 2014 a través del procesador de imágenes ERDAS Imagine® y se obtuvo el límite del estado de Hidalgo con base en el Marco Geoestadístico Estatal 2010 versión 5 del INEGI (Figura 2).

Las imágenes del año 2000 fueron calibradas de acuerdo con el procedimiento de Chander *et al.* (2009), utilizando los coeficientes radio-

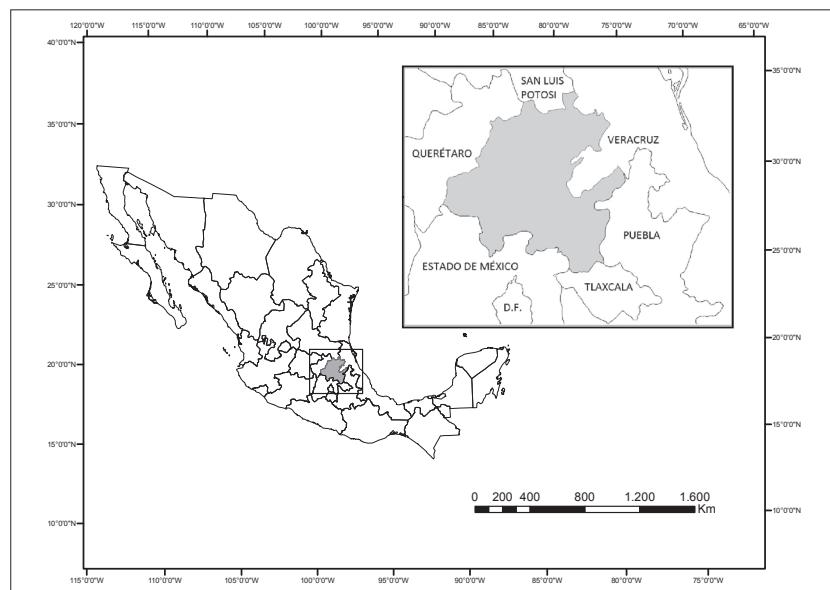


Figura 1. Localización del estado de Hidalgo (en gris) en la República Mexicana.

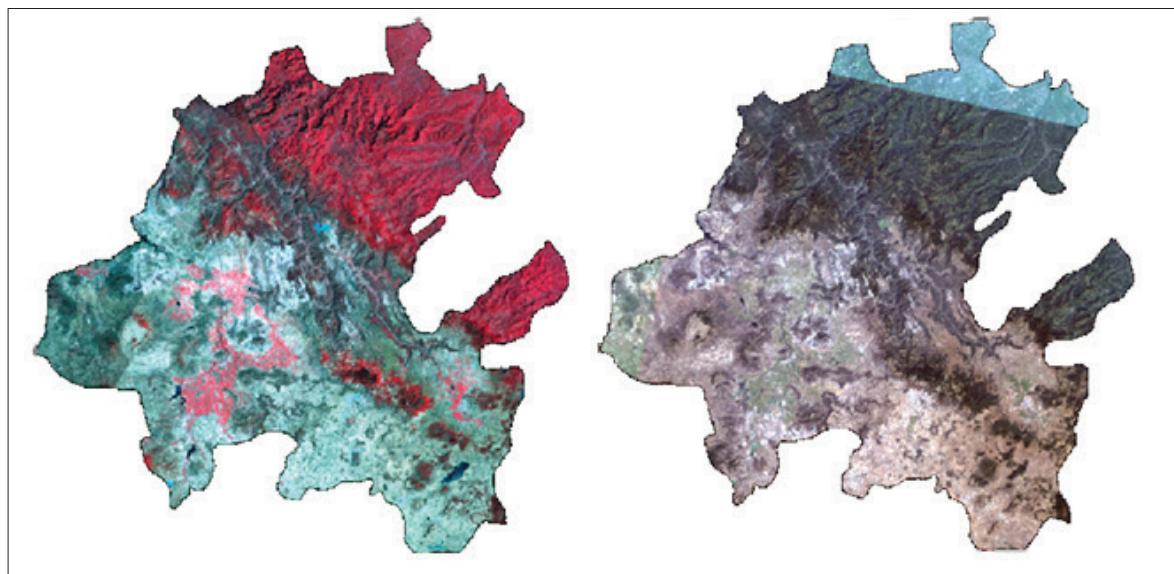


Figura 2. Compuestos en falso color (RGB:432) del mosaico de imágenes Landsat año 2000 (izquierdo) y año 2014 (derecha) para el estado de Hidalgo. Escala 1: 2 500 000.

métricos de los archivos de cabecera de cada una de las imágenes. A partir de dicha imagen estatal se obtuvieron polígonos representativos del área de interés (zonas urbanas) y se generó una imagen ráster con las zonas urbanas a través del método supervisado de clasificación por Máxima Verosimilitud en el software ERDAS Imagine®. Con este proceso se obtuvo la capa vectorial base (año 2000) de zonas urbanas de Hidalgo y se validó con la cartografía de uso del suelo y vegetación serie III del INEGI escala 1: 250 000, cuya información corresponde al año 2002.

Análisis y detección de cambios

La detección de cambios del crecimiento urbano se realizó por el proceso de posclasificación mediante una sobreposición de capas vector-ráster obtenidas previamente. Es decir, el mapa de uso urbano del año 2000 se actualizó con el mosaico de imagen estatal del año 2014 para obtener la segunda capa vectorial por medio de digitalización (Figura 3).

Una vez generados ambos mapas se calcularon las áreas totales de los polígonos urbanos para los años 2000 y 2014 así como la tasa de expansión urbana por municipio en dicho periodo.

Adicionalmente, el producto cartográfico del año 2014 se analizó sobreponiendo la red carretera

del estado de Hidalgo tomada de los archivos vectoriales del INEGI y se generó un mapa de densidad carretera en ArcGIS10.0® con la herramienta de análisis de proximidad *buffer* (zona de influencia). Esta herramienta crea un archivo de salida ráster que muestra la distancia de cada celda de un conjunto de entidades por el método euclíadiano y sirvió para realizar una comparación espacial de la distribución de las áreas de influencia de la infraestructura vial y las zonas urbanas en el estado.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las imágenes Landsat utilizadas (resolución espacial de 30 m por pixel) permitieron cartografiar 103 polígonos urbanos en el territorio estatal para el año 2000 y 123 polígonos para el año 2014. Al igual que un estudio semejante realizado por Couturier *et al.* (2011) en el Valle de Toluca-Atlaculco, se encontraron diferencias en el número de objetos urbanos reportados en la base de datos de referencia. En este estudio y en el antes citado se encontró una cantidad mayor de polígonos urbanos y coincidimos que, en general, ciertas zonas urbanas están subrepresentadas en la cartografía del INEGI.

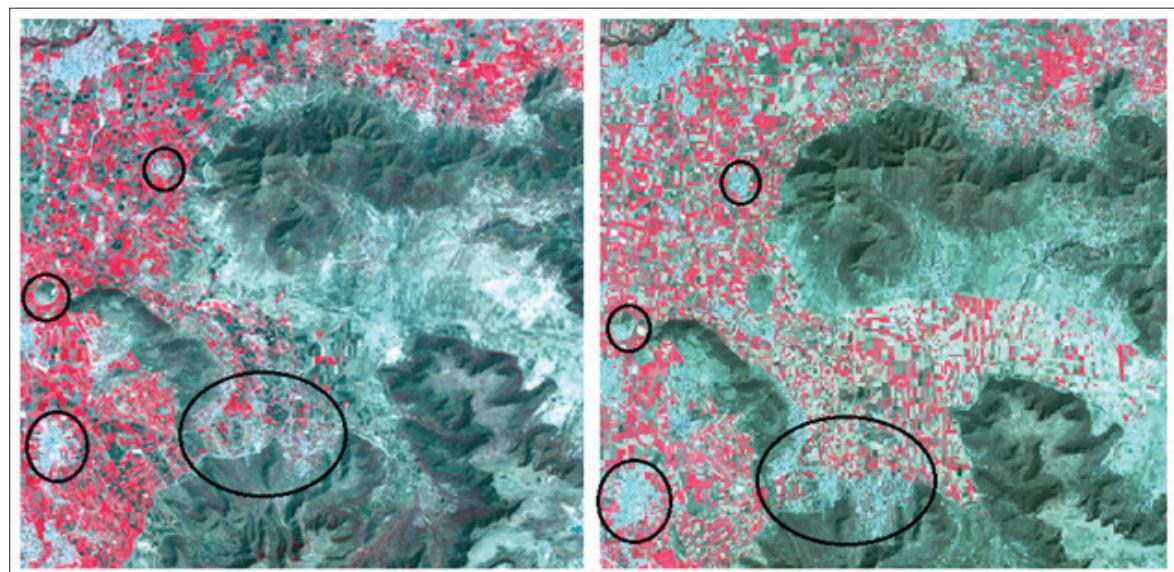


Figura 3. Ejemplo de zonas con notable crecimiento urbano en la región del Valle del Mezquital, Hidalgo. Izquierdo: año 2000 (RGB: 432). Derecha: año 2014 (RGB: 543). Las zonas urbanas en ambas imágenes están representadas por color cian.

Por otro lado, debido a la naturaleza heterogénea de las áreas urbanas, todos los polígonos extraídos se identificaron como zonas con desarrollo urbano, desde pequeños centros poblacionales (24 ha. para nuestro caso de estudio) hasta los densos núcleos consolidados. La superficie urbana total en el periodo de estudio se presenta en la Tabla 2.

A primera vista el crecimiento porcentual de la superficie urbana en el estado pareciera insignificante (0.35 %); no obstante, los resultados revelan una tasa de crecimiento estatal para dicho periodo del 25.7%. Esto representa una expansión urbana de 7 230.32 ha en 14 años y una tasa promedio anual de 516.45 ha. Aunque no se tienen registros previos de la tasa de expansión urbana en Hidalgo, estas cifras sugieren una expansión urbana acelerada debida posiblemente al crecimiento poblacional. En un estudio similar realizado por López y Plata

(2009) se encontró que la superficie urbana de la Zona Metropolitana del Valle de México en el periodo 1990-2000 aumentó 202 km², 130 km² más que el incremento de la superficie urbana de Hidalgo en un lapso de tiempo semejante.

De acuerdo con el Censo de Población y Vivienda 2010 del INEGI, la tasa de crecimiento poblacional en Hidalgo del año 2000 al 2010 fue de 1.7% y varios de los municipios con mayor incremento de su población (nombres en negrita en la Tabla 3) coinciden con los municipios de mayor expansión de superficie urbana del estado en los últimos años. No obstante, el crecimiento urbano no fue homogéneo, los municipios de Tetepango, Tizayuca y la zona conurbada de Pachuca-Mineral de la Reforma fueron las regiones con mayor tasa de expansión urbana (Figura 4). A excepción de Pachuca (69%), dichos municipios reflejaron una tasa de crecimiento cercana o superior al 100% durante los últimos 14 años. Otros municipios con un crecimiento urbano importante se muestran en la Tabla 3. Asimismo, en el mapa mostrado en la Figura 4 se aprecia que las regiones de la Comarca Minera y Cuenca de México fueron las que reflejaron un mayor incremento y coinciden con las zonas de mayor densidad carretera en el estado. Sin em-

Tabla 2. Superficie urbana total del estado de Hidalgo.

Año	ha	%
2000	28 115.81	1.35
2014	35 346.13	1.70

Tabla 3. Municipios con mayor crecimiento urbano en el periodo 2000-2014.

Municipio	Región Geográfica	Superficie urbana (ha)		Lugar por tasa de expansión
		Año 2000	Año 2014	
Mineral de la Reforma	Comarca Minera	890.80	2 524.93	1°
Tetepango	Valle del Mezquital	328.08	662.27	2°
Tizayuca	Cuenca de México	1 143.00	2 214.00	3°
Pachuca de Soto	Comarca Minera	3 128.43	5 273.90	4°
Cuautepec de Hinojosa	Valle de Tulancingo	79.25	130.48	5°
Villa de Tezontepec	Cuenca de México	154.30	241.00	6°
Francisco I. Madero	Valle del Mezquital	162.82	254.30	7°
Epazoyucan	Comarca Minera	137.40	187.00	8°
Tolcayuca	Cuenca de México	322.88	393.19	9°
Tulancingo de Bravo	Valle de Tulancingo	1 361.20	1 639.36	10°
Apan	Altiplanicie Pulquera	370.58	444.77	11°
Tlahuelilpan	Valle del Mezquital	387.25	443.90	12°
Tezontepec de Aldama	Valle del Mezquital	899.64	977.17	13°
Mixquiahuala	Valle del Mezquital	660.00	711.72	14°
Total		10 025.63	16 097.99	

Nota: los municipios resaltados presentaron la mayor tasa de crecimiento poblacional según el Censo de Población y Vivienda 2010 del INEGI.

bargo, la mayoría de los municipios que registraron crecimiento de sus polígonos urbanos pertenecen a la región del Valle del Mezquital (Tabla 3). Cinco municipios más reflejaron crecimiento urbano en menor proporción: Almoloya, Santiago Tulantepec, Huichapan, Zimapán, Huejutla de Reyes y Tlanchinol (tasas de crecimiento urbano menores al 7% en el periodo estudiado).

De acuerdo con estos resultados y con el mapa de densidad carretera obtenido, se encontró que además de la zona centro-sur del estado de Hidalgo, la región del Valle del Mezquital tiene una alta densidad vial y a pesar de su uso del suelo predominantemente agropecuario, representa una zona potencial para la expansión de centros urbanos (Figura 4). Esto sugiere la posibilidad de que a mediano plazo exista en esta región una manifestación más dinámica del uso del suelo que en las demás regiones geográficas del estado de Hidalgo. Asimismo, el tipo de centros urbanos con mayor crecimiento coincide con las observaciones de López y Plata (2009) y Bazant (2010), quiénes

mencionan que las periferias rurales son las regiones mayormente involucradas en el crecimiento urbano metropolitano. Cabe señalar que a partir del 2011 el área de influencia de la Zona Metropolitana del Valle de México se amplía oficialmente hacia el norte y dentro de ella se integran 21 municipios del estado de Hidalgo (Flores *et al.*, 2012), los cuales incluyen: Ajacuba, Atitalaquia, Atotonilco de Tula, Epazoyucan, Mineral de la Reforma, Mineral del Monte, Mixquiahuala de Juárez, Pachuca de Soto, Progreso de Obregón, San Agustín Tlaxiaca, Tepeji del Río, Tetepango, Tezontepec de Aldama, Tizayuca, Tlahuelilpan, Tlaxcoapan, Tolcayuca, Tula de Allende, Villa de Tezontepec, Zapotlán de Juárez y Zempoala.

De acuerdo con el Sistema Urbano Nacional (SUN) (2012), el sur del estado de Hidalgo es una de las regiones del país con mayor número de centros conurbados y densidad poblacional, al igual que algunas entidades colindantes como Puebla, Estado de México y Distrito Federal. A nivel nacional, el crecimiento urbano del año 1980

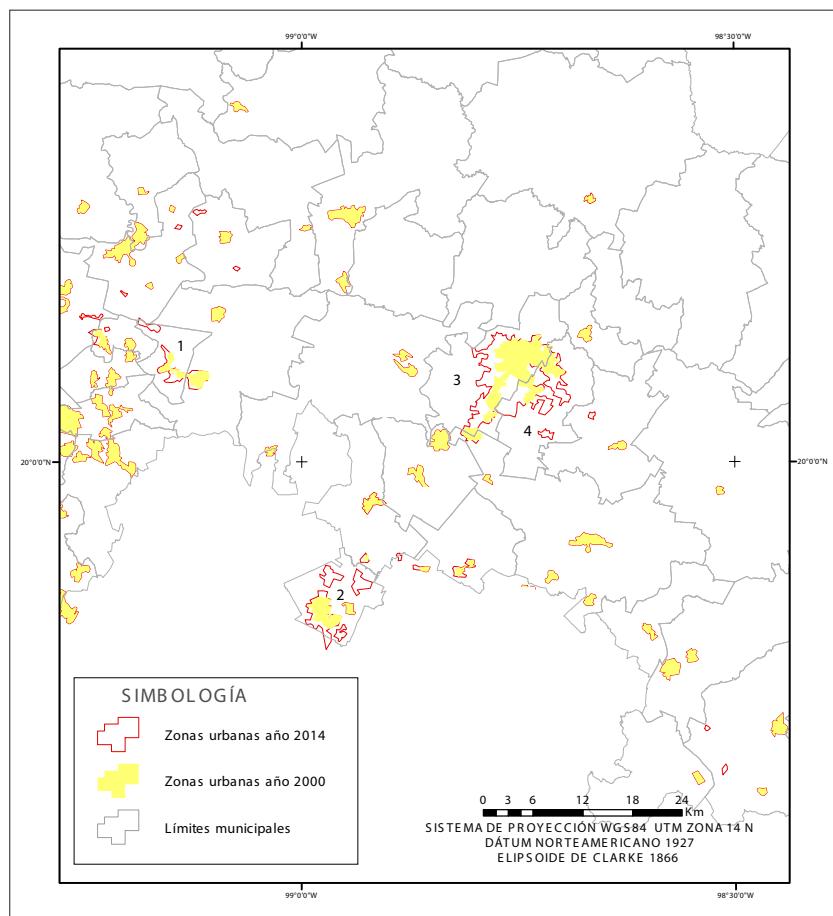


Figura 4. Vista ampliada de los cuatro municipios con mayor tasa de crecimiento urbano en Hidalgo (1: Tetepango, 2: Tizayuca, 3 y 4: Zona conurbada de Pachuca-Mineral de la Reforma).

a la actualidad se consideró moderado con respecto al crecimiento acelerado ocurrido en el periodo 1940-1980. No obstante, durante el periodo 2005-2010, se incrementó el número de centros urbanos y el SUN incorporó seis unidades de conurbación en el país. Una de ellas se localiza en el estado de Hidalgo y fue denominada Tetepango-Ajacuba, que concuerda en nuestro estudio con la zona del Valle del Mezquital que reflejó las más altas tasas de expansión urbana en la entidad.

Con el análisis anterior finalmente se estableció que la zona de crecimiento urbano está delimitada por la zona que atraviesa el Libramiento del Arco Norte en el estado de Hidalgo (Figura 5). No obstante, conviene realizar un análisis más detallado para la identificación de factores ambientales locales que estén influenciando o acelerando la tasa de expansión urbana principalmente en la región del

Valle del Mezquital. Asimismo, sería conveniente realizar la extracción de la cobertura urbana por otros métodos más novedosos, como el análisis morfo-espacial para escalas regionales propuesto por Couturier *et al.*, (2011), quienes han desarrollado criterios de obtención de polígonos urbanos en diversos categorías a través de imágenes Landsat para mejorar la calidad de la información cartográfica de nuestro país.

Cabe destacar, siguiendo a Bazant (2010), que cuando el crecimiento urbano se caracteriza por la conurbación de ciudades (como es el caso de estudio), y no por el aumento de superficie en centros urbanos independientes, la planeación urbana se convierte en un reto aún mayor debido a que cada municipio está sujeto a regulaciones político-administrativas previamente establecidas.

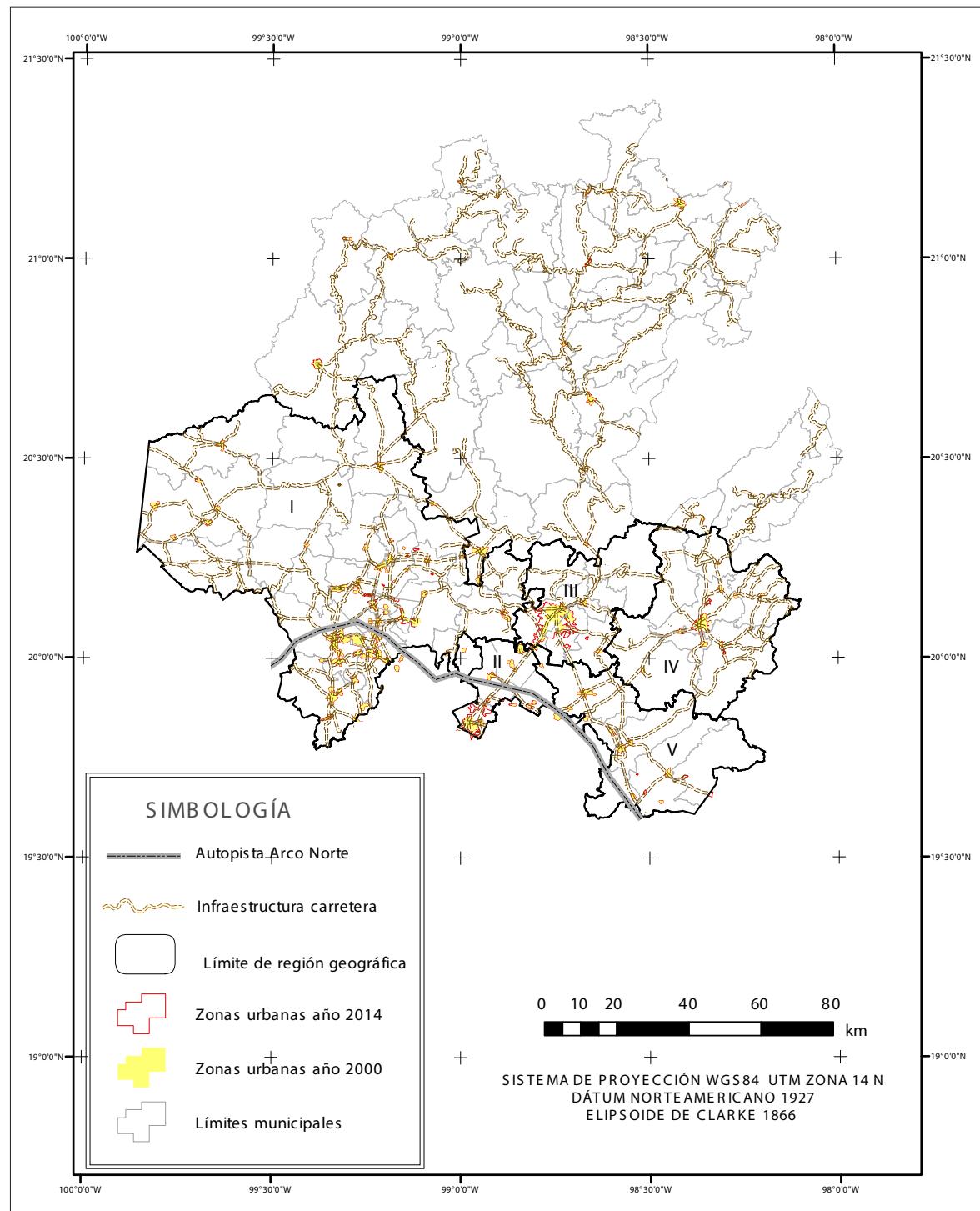


Figura 5. Ubicación de los municipios con mayor expansión urbana e influencia carretera. 1: Tezontepec de Aldama, 2: Mixquiahuala de Juárez, 3: Tlahuelilpan, 4: Francisco I. Madero, 5: Tetepango, 6: Tizayuca, 7: Tolcayuca, 8: Villa de Tezontepec, 9: Pachuca de Soto, 10: Mineral de la Reforma, 11: Epazoyucan, 12: Tulancingo, 13: Cuautepec de Hinojosa, 14: Apan.

En este sentido, es conveniente que se continúe generando información geográfica cuantitativa para la integración de otros indicadores de ordenación del territorio que faciliten la aplicación de instrumentos políticos de planeación en los tres niveles de organización territorial de México de manera eficiente.

CONCLUSIONES

La ocupación urbana del suelo en el estado de Hidalgo creció 7 230.32 ha del 2000 al 2014. Esto representa un incremento de la tercera parte de la superficie urbana durante diez años en la Zona Metropolitana del Valle del México. Las zonas con mayor tasa de expansión urbana en Hidalgo se ubicaron en la parte centro-sur del estado que convergen con las zonas agrícolas y de mayor infraestructura carretera. Simultáneamente, estas zonas pertenecen a los municipios hidalguenses incluidos recientemente en la región norte de la Zona Metropolitana del Valle de México. Los cuatro municipios con mayor crecimiento urbano en el periodo de estudio fueron Mineral de la Reforma, con una tasa de expansión del 183.4%; Tetepango, con una tasa del 102%; Tizayuca, con una tasa del 94% y Pachuca, con una tasa del 68.5%. Los hallazgos de esta investigación sugieren la transformación del Valle del Mezquital de un territorio rural a uno heterogéneo (rural-urbano) e indican que el establecimiento de asentamientos humanos en el estado de Hidalgo está fuertemente determinado por el desarrollo económico regional del centro del país.

Este trabajo enfatizó la necesidad de encaminar el desarrollo urbano hacia una gestión del territorio que permita una distribución urbana más propicia para el uso adecuado del recurso suelo como parte de las nuevas políticas de manejo sustentable en México.

BIBLIOGRAFÍA

Arriaga, L. (2009). "Implicaciones del cambio de uso de suelo en la biodiversidad de los matorrales xerófilos:

- un enfoque multiescalar". *Investigación ambiental*, 1(1), pp. 6-16.
- Bazant, J. (2010). "Expansión urbana incontrolada y paradigmas de la planeación urbana". *Espacio Abierto*, 19(3), pp. 475-503.
- Chander, G., Markham, B. y Helder, D. (2009). "Summary of current calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+ and EO-1 ALI sensors". *Remote Sensing of Environment*, 113, pp. 893-903.
- Couturier, S., Ricárdez, M., Osorno, J. y López-Martínez, R. (2011). "Morpho-spatial extraction of urban nuclei in diffusely urbanized metropolitan areas". *Landscape and Urban Planning*, 101, pp. 338-348.
- FAO (2010). *Evaluación de los recursos forestales mundiales: Informe Nacional México*, Roma: FAO.
- Flores, S., Bournazou, E. y Soto, E. (2012). *Programa de Ordenación de la Zona Metropolitana del Valle de México*, Síntesis Ejecutiva, México.
- Hansen, M. C. y Loveland, T. R. (2012). "A review of large area monitoring of land cover change using Landsat data". *Remote Sensing of Environment*, 122, pp. 66-74.
- INEGI (2010). *Censo de Población y Vivienda 2010*. México. Recuperado de <http://cuentame.inegi.org.mx/>.
- INEGI (2012). *Anuario Estadístico de Hidalgo*, México.
- Jensen, J. R. (2005). *Introductory Digital Image Processing: A remote Sensing Perspective*, tercera edición. Prentice Hall, pp. 337-406.
- López , V. H. y Plata, W. (2009). "Análisis de los cambios de cobertura de suelo derivados de la expansión urbana de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, 1990-2000". *Investigaciones Geográficas*, 68, pp. 85-101.
- Mas, J. F., Velázquez, A. y Couturier, S. (2009). "La evaluación de los cambios de cobertura/uso del suelo en la República Mexicana". *Investigación ambiental*, 1(1), pp. 23-39.
- Michelsen, O. (2007). "Assessment of Land Use Impact on Biodiversity. Proposal of a new methodology exemplified with forestry operations in Norway". *International Journal of Life Cycle Assessment*, 13(1), pp. 22-31.
- NASA (2010). *Landsat's Critical Role in Urban Planning: Hot Times in the City*, EE.UU.
- Santos, C., Escamilla, I. y Guarneros, L. (2010). "Expansión urbana al norte de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México: ¿un triángulo de deterioro ambiental sin posibilidad de desarrollo sustentable?". En M. T. Sánchez Salazar, G. Bocco, J. M. Casado Izquierdo (Coords.). *La política de ordenamiento territorial en México: de la teoría a la práctica*. México: Instituto de Geografía, UNAM, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.

Secretaría de Desarrollo Social y Consejo Nacional de Población (2012). *Catálogo Sistema Urbano Nacional*. México.

SEMARNAT (2012). *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México*. México: SEMARNAT.

SGM, Servicio Geológico Mexicano (2011). *Panorama minero del estado de Hidalgo*. México: Coordinación General de Minería.

Thorp, S., Rivers, R. y Pebbles, V. (1997). Impacts of Changing Land Use. Michigan, EE.UU.