



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.gesig-proeg.com.ar> (ISSN 1852-
8031)

Luján, Año 6, Número 6, 2014, Sección I: Artículos. pp. 226-241.

**CRECIMIENTO URBANO Y SU IMPACTO ESPACIAL EN LOS
PROCESOS DE SUBSIDENCIA EN EL VALLE DE TOLUCA-MÉXICO
A PARTIR DE IMÁGENES SATELITALES**

**Norma Dávila-Hernández¹ – Brisa Violeta Carrasco Gallegos
Xanat Antonio Némiga**

Universidad Autónoma del Estado de México
Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica
Cerro de Coatepec s/n, Ciudad Universitaria
– Toluca – Estado de México, México.
E-mail: nadavilah@uaemex.mx

RESUMEN

El crecimiento poblacional desmedido en las metrópolis mexicanas ha generado un conjunto de impactos negativos en el ambiente y en la sociedad, donde uno de los problemas más sentidos que esta expansión urbana ha generado es la escasez de agua. El objetivo de la presente investigación es describir la asociación espacial entre el crecimiento urbano y las zonas de subsidencia del acuífero del Valle de Toluca. Para ello se emplearon imágenes satelitales SPOT de los años 2004 y 2013 y técnicas de regresión espacial con la finalidad de analizar el crecimiento de áreas urbanas y su relación con procesos de subsidencia del terreno vinculados con la sobreexplotación del acuífero.

Palabras clave: Crecimiento urbano, subsidencia acuífera, teledetección, Valle de Toluca

ABSTRACT

The excessive population growth in Mexican cities has generated a number of negative impacts on the environment and society, where one of the most sensitive problems that this urban expansion has generated is water scarcity. The objective of this research is to describe the spatial association between urban growth and areas of subsidence Toluca Valley aquifer. To do SPOT satellite images of 2004 and 2013 and spatial regression techniques in order to analyze the growth of urban areas and their relationship to land subsidence processes linked to the overexploitation of the aquifer were used.

Keywords: Urban growth, aquifer subsidence, remote sensing, Toluca Valley

INTRODUCCIÓN

Las zonas urbanas han presentado una expansión exponencial en los últimos veinte años, debido a la atracción de población, pero también debido a una planeación deficiente o sectorizada en polos de desarrollo desvinculados a los centros urbanos (ONU, 2011).

La población urbana en México representa el 72% del total en 2012, y se distribuye en 383 ciudades que conforman el sistema urbano nacional (INEGI, 2012) y las proyecciones poblacionales indican que en 2030 habrá más de veinte ciudades con más de un millón de habitantes. (ONU y SEDESOL, 2011). Éste exacerbado crecimiento de las zonas urbanas, ha traído como fenómeno la metropolización de esas áreas, implicando un crecimiento de la zona urbana central sobre los municipios aledaños. El territorio que conforma el área de influencia de una ciudad se convierte en un escenario complejo conformado por espacios plenamente urbanizados en combinación con espacios intersticiales, producto de una urbanización discontinua en la que se mezclan zonas de cultivo, espacios baldíos, pastizales, elementos de importancia natural e infraestructura para las actividades productivas. De esta forma, el proceso de metropolización trae como consecuencia el crecimiento disperso y no planificado sobre espacios rurales, la desarticulación de la estructura urbana; así como sus efectos asociados tales como el riesgo a inundaciones, subsidencia del terreno y deslizamientos principalmente (Arias, 2010).

La zona metropolitana de Toluca es la quinta más poblada del país e incluye 15 municipios: nueve de ellos son de tipo central, presentan conurbación física y concentran el 87.5 % de la población de la zona metropolitana (1, 693,404 habitantes). Mientras que los seis municipios restantes han sido incluidos en la zona metropolitana como municipios exteriores bajo el criterio de integración funcional, en ellos se concentra tan solo el 12.5% de la población (242,722 habitantes).

Entre los impactos que se derivan de la expansión urbana y la generación de zonas metropolitanas, tenemos los de tipo ambiental. En este caso, la escasez de agua es

un factor crítico, particularmente en algunas regiones como lo es el Valle de Toluca (VT). Específicamente, el municipio de Lerma inició un proceso de expansión impulsado por el uso industrial, debido a la política de expulsión de la industria del Distrito Federal; generando así una conurbación física con Toluca y una expansión de la mancha urbana sobre el eje carretero México-Toluca (sector este de la ciudad de Toluca). El uso industrial requiere de grandes cantidades de agua, por lo que en ese municipio, existen más de 300 pozos perforados a 300 m de profundidad. Lo anterior ha provocado escasez de agua, agrietamientos y subsidencias de suelo; esto debido a la sobre explotación del acuífero. Así, la disminución de los niveles del agua profunda, tiene como consecuencias la extracción de aguas profundas. De igual forma, los efectos de la disminución de los niveles piezométricos se refleja en el terreno superficial con la aparición de grietas y los hundimientos superficiales, que provocan daños en las construcciones y equipamiento urbano; por lo que este fenómeno ya ha dejado sentir sus efectos en la zona urbana del VT.

Por ello, el objetivo de esta investigación es describir la correlación espacial de procesos de subsidencia y el crecimiento urbano histórico de la Zona Metropolitana de Toluca (ZMT) utilizando técnicas de realce espectral y segmentación, con base en imágenes SPOT (Satellite Pour l'Observation de la Terre) 5 y SPOT 6, de mediana y alta resolución.

ANTECEDENTES DEL ÁREA DE ESTUDIO

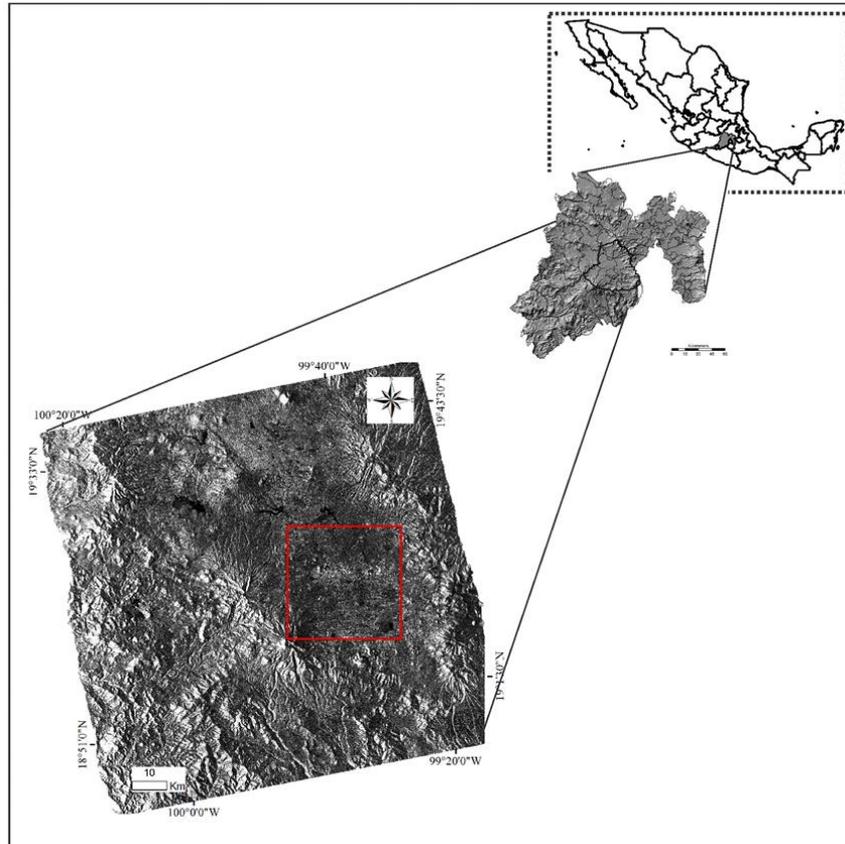
El Acuífero del Valle de Toluca (AVT) se localiza en la parte centro poniente del Estado de México (Figura 1). Las políticas públicas deficientes han propiciado en la región una crisis sobre la disponibilidad del recurso. En 1857 el gobierno mexicano inicia obras para la desecación de la ciénega, y en 1950 empieza a funcionar el Sistema Lerma, que abastece desde entonces, parte de las necesidades de agua del Distrito Federal. Como consecuencia, para 1957, la ciénega contaba solamente con 10,000 ha, que a la fecha se han disminuido a 3,000 ha (GEM, 2005). De esta forma, se estima que en la actualidad existen más de 350 pozos de extracción que abastecen al 30% de la población de la Ciudad de México.

Esta zona altamente industrializada, ha sufrido de niveles mayores de extracción del recurso, para su uso en los procesos productivos. Además de los pozos que legalmente tienen permiso para la extracción de agua, se cuenta con un número de pozos que ilegalmente extraen el recurso; por lo que no se puede cuantificar con exactitud la cantidad que actualmente es extraída del acuífero. Oficialmente existen 795 aprovechamientos: 404 pozos público-urbanos, 172 industrial, 162 para uso agrícola. (Bastida, 2009).

De esta forma, desde el año 2008 la Comisión Nacional del Agua señalaba al AVT como uno de los 101 acuíferos sobreexplotados del país, ya que los niveles de

extracción que registra sobrepasan en más de 33% el valor de recarga. A pesar de que se tiene conocimiento de la gravedad de esta problemática, no se han tomado las medidas necesarias para empezar a administrar este recurso en la entidad.

Figura 1. Localización de la zona de estudio



MATERIALES, DATOS Y MÉTODOS

El método empleado incluye tres etapas: a) realce espectral para la segmentación del continuo urbano con imágenes SPOT para realizar un análisis multitemporal, b) correlación espacial entre crecimiento urbano y deformaciones superficiales del terreno a partir de la técnica Persistent Scatterer (PS) desarrollado por Ferreti et al., 2000 y aplicado por Dávila et al., 2014 en la zona de estudio, c) validación de las áreas de crecimiento urbano coincidentes con las mayores velocidades de deformación del terreno considerando variables o indicadores asociados a la extracción de agua del acuífero.

De esta forma, el apartado metodológico enfatiza por un lado, el realce espectral del crecimiento urbano y discontinuo urbano del VT para evaluar la correlación espacial entre el crecimiento urbano y las áreas afectadas por procesos de subsidencia del terreno asociadas a la sobreexplotación del acuífero, considerando los datos publicados por Dávila et al., 2014; donde fue realizado un análisis multi-temporal de subsidencias empleando una técnica de interferometría diferencial (DinSAR) conocida como

Persistent Scatterer (PS) para el periodo 2003-2010 en la zona de estudio. La técnica PS se basa en la selección de “pixeles candidatos” o “coherentes” de imágenes de radar complejas que conservan información del cambio de fase a través del tiempo asociada a la deformación de la superficie terrestre. Así, al trabajar con un conjunto de imágenes para un periodo de tiempo determinado, permite estimar velocidades de deformación de la superficie a escalas milimétricas/año. Es importante destacar que la selección de “pixeles candidatos” se asocia en el terreno con estructuras construidas por el hombre, esto debido a la alta retrodispersión que presenta la señal de radar al momento de interactuar con las estructuras urbanas; por lo que es considerada una de las técnicas más empleadas para el monitoreo urbano en los últimos años (Ferreti et al., 2000; Ferreti et al., 2001; López et al., 2009).

Por otra parte, se utilizaron 2 imágenes Spot 5 y 1 imagen Spot 6 para cubrir el área de estudio derivadas de una selección previa de datos históricos proporcionados por la Estación Satelital México Nueva Generación (ERMEX-NG). Con la intención de evaluar cambios mayores en el crecimiento urbano, se seleccionó una temporalidad 2004-2013. Así para el año 2004 se empleó el sensor Spot 5; mientras que para el año 2013 se empleó el sensor Spot 6; las características técnicas de las imágenes empleadas se enlistan en la Tabla 1.

Tabla 1. Características técnicas de las imágenes SPOT

Tipo de Sensor	Fecha de adquisición	Identificador K/J	Nivel de procesamiento
Spot 5	03/09/2004	587-311	1A
Spot 5	02/02/2004	587-312	1A
Spot 6	04/30/2013		Sensor

Se realizaron correcciones atmosféricas-radiométricas utilizando el módulo FLAASH de Envi 5.0, cuya técnica se basa en la estimación de la cantidad de partículas de aerosol y “haze” a partir de valores de reflectancia estándar para pixeles que presenten rangos entre los 660nm y 2100nm (Kaufman et al., 1997). Se consideró una restitución del pixel a 10m para ambos sensores con la finalidad de homogenizar resoluciones espaciales en las imágenes.

Posteriormente, el realce espectral del continuo urbano se realizó con base en el Análisis de Componente Independiente (ACI) el cual se define como un proceso en el cual un vector aleatorio (X) es resuelto a partir de una combinación lineal de variables aleatorias:

$$x_1 = a_1s_1 + a_2s_2 + \dots a_ns_n$$

donde a_1, \dots, a_n son los vectores base y s_1, \dots, s_n son las variables fuente, así la transformación lineal empleada $S=W\chi$, donde W el factor de la transformación lineal y

S es la componente decorrelacionada e independiente tanto como sea posible (Commond, 1994; Payam, 2009). Para maximizar la independencia de S o para minimizar la información mutua se utilizó la aproximación de Entropía definida de la forma:

$$H = \sum_{k=1}^N P_k \log_N (P_k)$$

donde, P_k corresponde a la probabilidad obtenida de la frecuencia de ocurrencia del valor radiométrico y N representa el número de niveles en tonalidades de despliegue de

la imagen. ACI permite generar componentes de salida independientes de donde cada una de ellas contiene información asociada a un rasgo específico de la imagen original; a diferencia de Componentes Principales (CP) donde las componentes o bandas de salida corresponden a una reorganización de la información donde las primera componente se salida se asocia a una mayor varianza y hacia las últimas componentes se asocia a ruido (Lira, 2002). De esta forma, ACI permitió separar información espectral asociada al continuo urbano, en específico facilitó el realce de áreas conocidas como intersticios que son aquellas áreas que no han sido urbanizados y se definen como espacios libres entre las manchas urbanas de los municipios que conforman la zona metropolitana; que en términos de realce espectral pueden resultar complejos para lograr discriminarlos en una imagen original.

Posteriormente, con la finalidad de realizar el análisis de detección de cambios entre los dos periodos se empleó el módulo conocido como Feature Extraction (FE) de Envi 5.0, el cual se basa en el uso simultáneo de reglas para la segmentación de la imagen. FE trabaja una aproximación basada en la detección de objetos, entendiendo por ello un grupo de píxeles con atributos espaciales, espectrales y texturales similares. Para la segmentación del objeto se utilizaron rangos espectrales y texturales en términos de la detección de bordes, ya que se consideró por un lado los altos valores de reflectancia que presentan los ambientes urbanos y por otro el patrón de cambios en la frecuencia de los valores digitales asociados su configuración geométrica en el espacio de la imagen.

RESULTADOS

La Figura 2 A-B muestra el resultado obtenido derivado de la aplicación de ACI con respecto a las imágenes originales Spot 5 y 6. La varianza asociada a las componentes de salida derivadas de ACI no fue considerada, ya que la separación de la información espectral se realiza de manera indistinta para cada uno de los elementos que componen la imagen de salida, por lo que no hay una separación selectiva.

Figura 2-A. Comparativo entre la imagen compuesta original del sensor SPOT 4 y la imagen resultado de la aplicación de ACI para el año 2004. Imagen A: Imagen compuesta Spot 5 corregida radiométricamente del sector norte de la zona de estudio; Imagen B: Imagen compuesta Spot 5 corregida radiométricamente del sector sur de la zona de estudio; Imagen A-ACI: Imagen compuesta Spot 5 de la transformada ACI del sector norte de la zona de estudio; Imagen B-ACI: Imagen compuesta Spot 5 de la transformada ACI del sector sur de la zona de estudio.

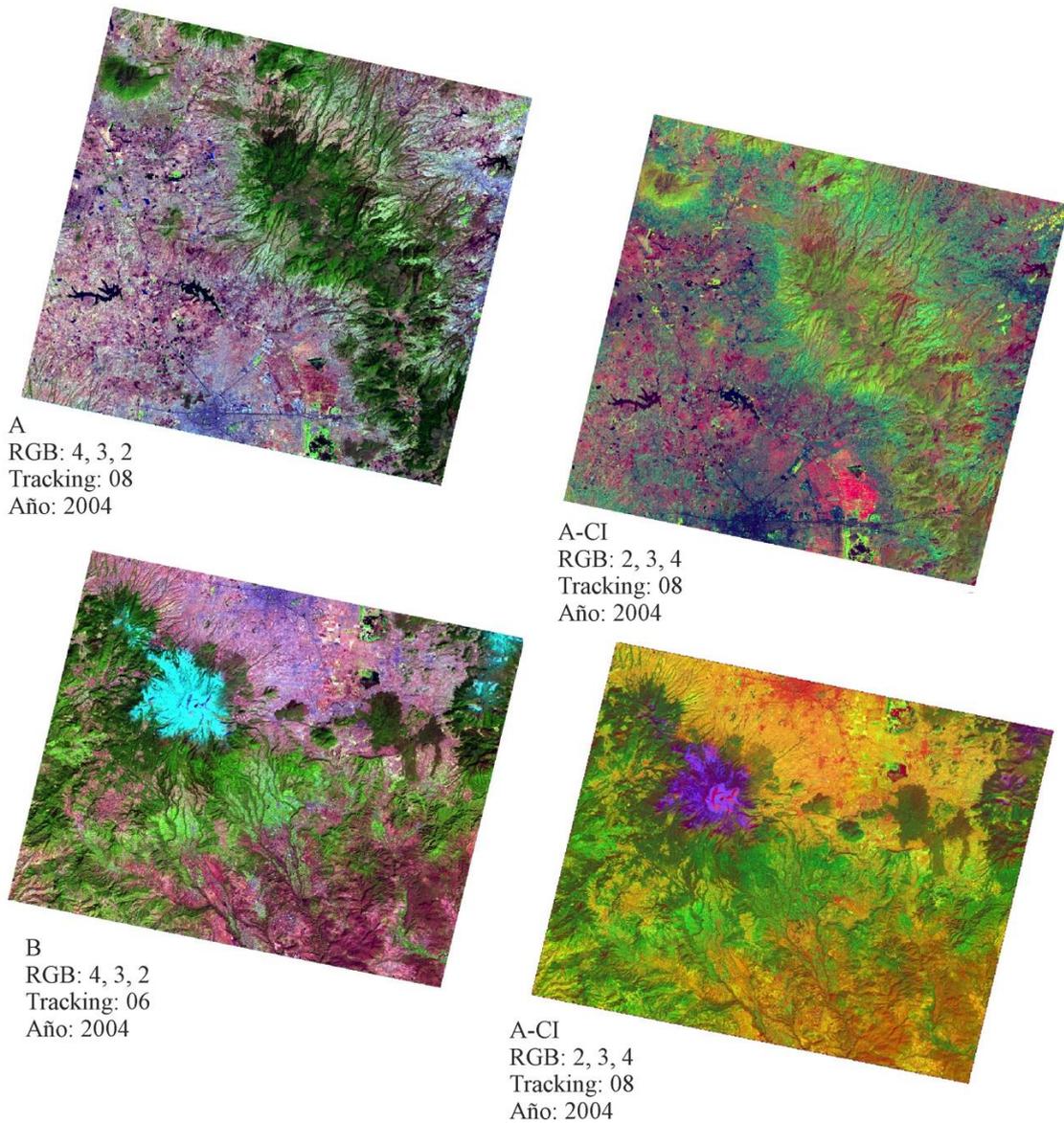
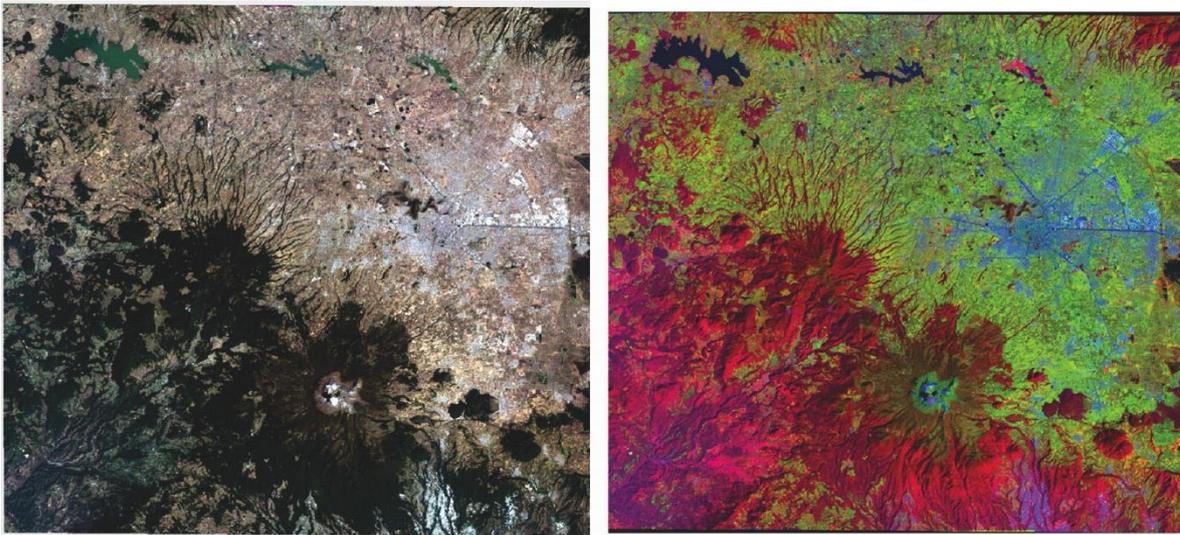


Figura 2-B. Comparativo entre la imagen compuesta original del sensor SPOT 6 y la imagen resultado de la aplicación de ACI para el año 2013.



RGB: 4, 3, 2
Tracking: 586
Año: 2014

CI
RGB: 2, 3, 4
Año: 2014

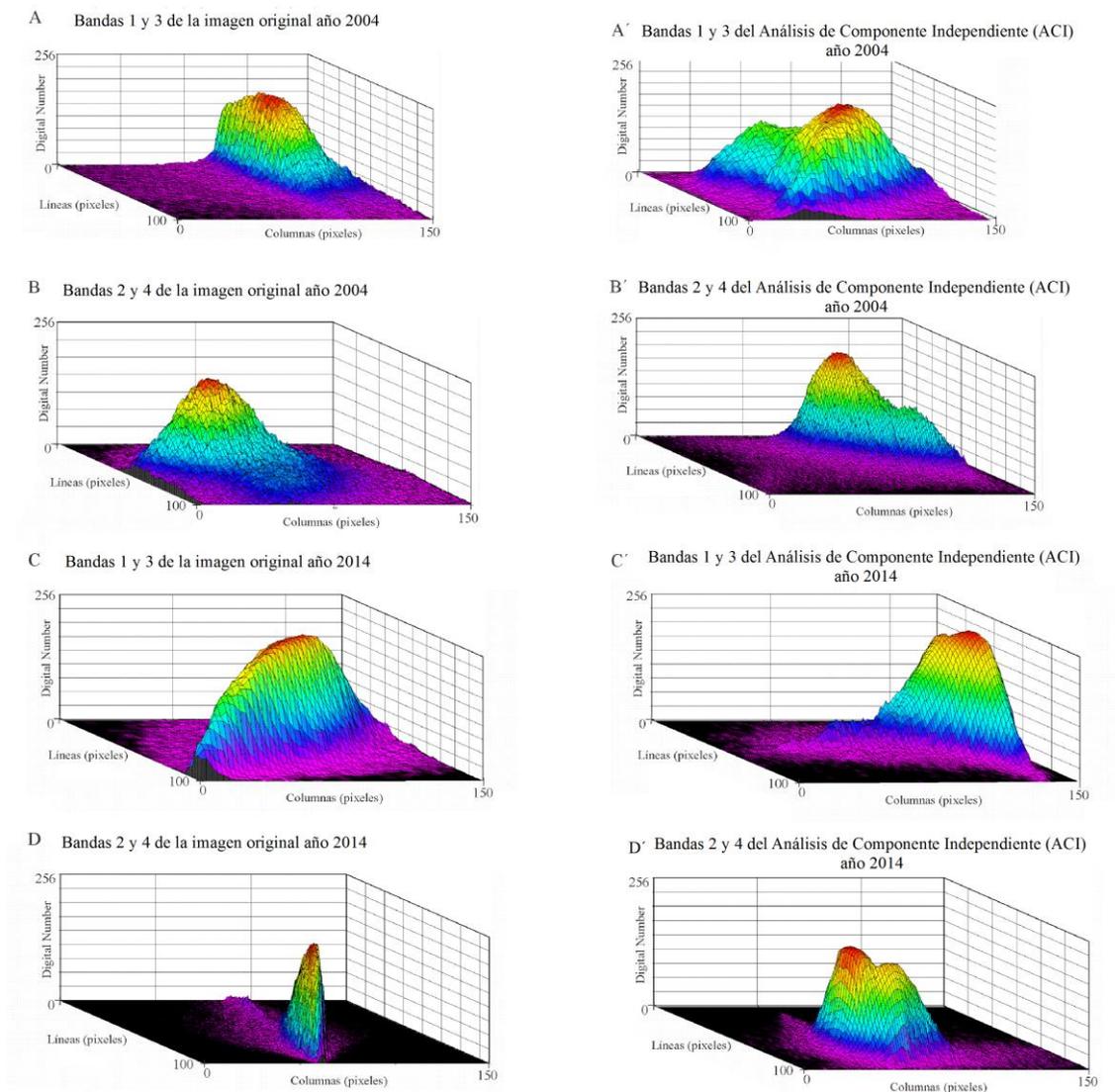
Con la intención de conocer el comportamiento y la variación espectral tanto del crecimiento urbano como del discontinuo urbano se realizaron distribuciones tridimensionales a partir de ventanas de 150 x 150 píxeles sobre un área representativa, donde en particular la segmentación del discontinuo urbano resultara representada por intersticios urbanos (Figura 3); que en términos de respuesta espectral de los objetos implica una mezcla de píxeles asociados a cultivos y equipamiento urbano-habitacional. Así, en la Figura 3-A, B, C, D, la distribución de los píxeles de las imágenes originales muestran un comportamiento unimodal tanto del año 2004 como 2013, mientras que la distribución de los píxeles asociados a transformación ACI (3-A', B', C', D'), presentan una distribución diferenciada por dos nubes de datos, la primera con máximos dentro del rango 140 a 162 DN (Digital Number por su definición en inglés) que representan al continuo urbano; mientras que la segunda nube de datos corresponde a el área rural o concentración de cultivos dentro de un rango de 50 a 78 DN.

Del mismo modo, como se puede observar en la Figura 4, se muestra el resultado obtenido de la segmentación del área urbana y continuo urbano para las imágenes Spot 5-2004 y Spot 6-2013, para el año 2004 se estimó un área total de 137 km², mientras que para el año 2013 de 218 km², estimando una razón de cambio para los 10 años de 114 km² lo que equivale a un crecimiento de la urbanización del 83%.

Posteriormente, se realizó una correlación espacial entre el área asociada únicamente a la razón de cambio y los resultados obtenidos de subsidencia del terreno asociados a procesos de abatimiento del acuífero en las inmediaciones del VT para el periodo 2003-2013; derivados de la aplicación del método Persistent Scatterer (PS)

(Dávila et al., 2014) mencionado anteriormente. De esta forma, en la Figura 5 se puede observar que el crecimiento urbano y discontinuo urbano para la década considerada se concentran en su mayoría hacia la zona norte-noreste-este, que a su vez coincide con la mayor

Figura 3. Comparativo de la distribución espectral entre las imágenes originales y la transformación vectorial del ACI tomada de una muestra del discontinuo urbano de las imágenes Spot 5 - 2004 y Spot 6 - 2013.



concentración de puntos PS en localidades como San Pedro Autopan y San Miguel Totoltepec. Así, mediante la aplicación de una herramienta de SIG (Sistemas de Información Geográfica) se realizó una combinación lineal entre los datos, estimando que el 76% de los puntos PS coincidentes con el área de crecimiento corresponden a rangos de mediana y mayor velocidad promedio de subsidencias del terreno que oscilan entre los 40 y 83mm/año. De esta forma, se realizó una validación de la correlación

espacial que se presenta a continuación entre estos dos fenómenos causados por los procesos de metropolización en el AVT.

Figura 4. Resultado de la segmentación del área urbana y discontinuo urbano derivada de la transformación ACI y segmentación FE aplicada a las imágenes Spot 5 – 2004 y Spot 6 – 2013.

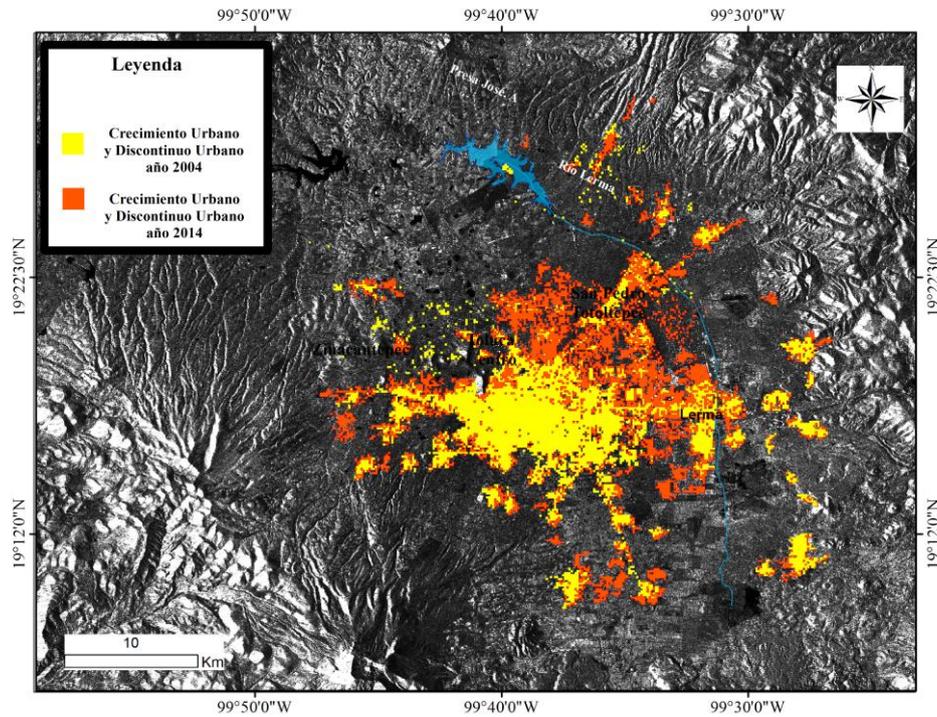
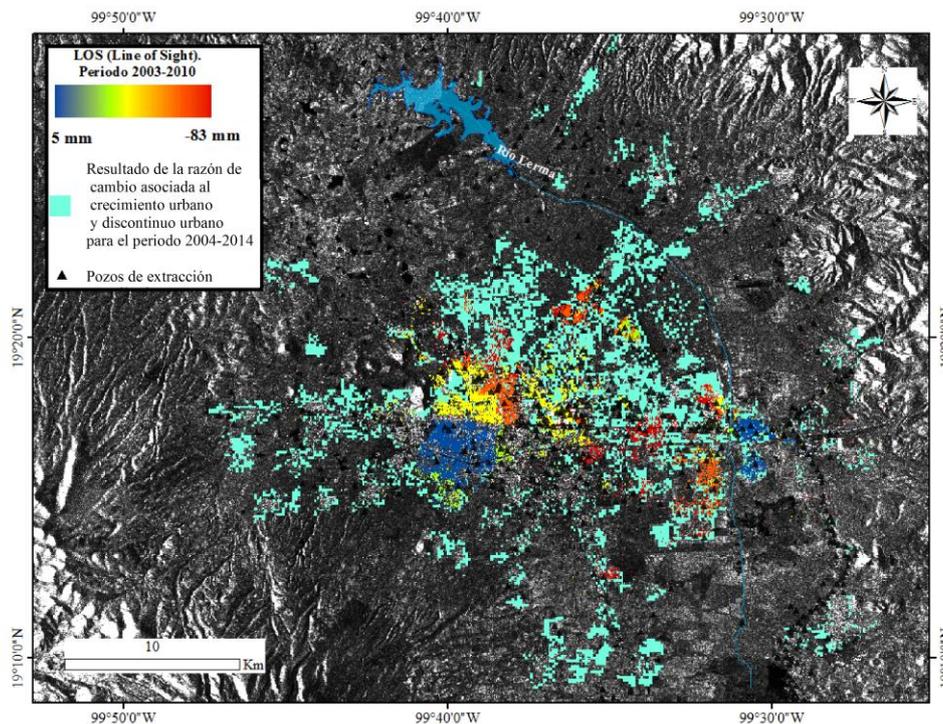


Figura 5. Sobreposición del resultado obtenido de la razón de cambio (del crecimiento urbano y discontinuo urbano) para el periodo 2004-2013 y el mapa de velocidad de deformación a partir de la aplicación del método Persistent Scatterer (PS) (Dávila et al., 2014).



VALIDACIÓN DE LOS DATOS Y DISCUSIÓN

Con la finalidad de conocer la dependencia o heterogeneidad espacial de los procesos de subsidencia estimados por Dávila (et al., 2014) con el área segmentada del crecimiento urbano derivada de ACI, se consideraron variables que pudieran evidenciar una relación con la sobreexplotación del acuífero. Ya que de acuerdo con registros históricos piezométricos, el AVT es considerado el segundo acuífero más explotado en México; teniendo su expresión en superficie a partir cualquier tipo de movimiento diferencial (Diez, 2010; Calderhead et al., 2011).

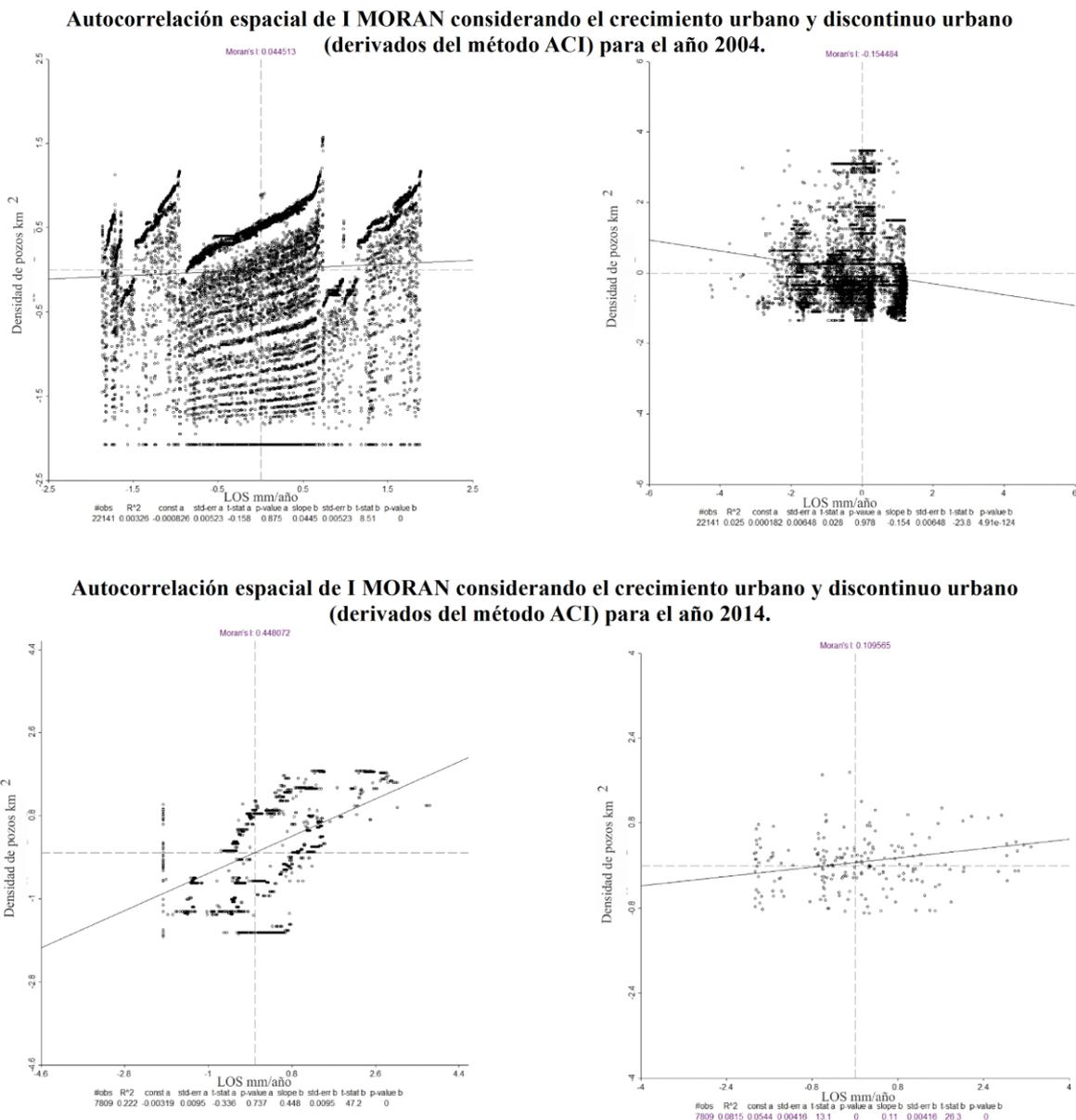
Así, los indicadores considerados fueron los datos de densidad de pozos de extracción por km² y el volumen de extracción por Mm³ con base en el registro histórico de batería de pozos ante el sistema REPDA-CONAGUA. De esta forma se obtuvieron dos grupos de datos, el primero se refiere a todos aquellos datos considerados dentro del área segmentada asociada al crecimiento urbano del año 2004 y el segundo grupo para todos los datos contenidos en el área segmentada del 2013; es decir, el área asociada únicamente a la razón de cambio de la década considerada.

Para llevar a cabo la correlación espacial de los datos, se empleó la regresión espacial de I Moran, la cual es una medida bivariada que permitió estimar la significancia estadística de la autocorrelación espacio-temporal de los objetos involucrados y sus vecinos; permitiendo así el manejo de dos variables (estandarizadas) al mismo tiempo (Moran, 1948). Por consiguiente el fenómeno de autocorrelación espacial puede ser estudiado partiendo de la premisa que la distribución de una variable pueda ser aleatoria o tener una asociación significativa entre los valores parecidos o diferentes entre áreas vecinas. En la Figura 6 se muestran 4 dispersogramas derivados de la autocorrelación bivariada de I Moran, así los dispersogramas 6-a y 6-a' representan las autocorrelaciones para el área 2004 considerando las variables de velocidad de deformación con respecto a densidad de pozos y volumen de extracción de agua subterránea respectivamente. La pendiente de la recta del dispersograma 6-a muestra un grado de asociación lineal de 0.04453, obteniendo un ángulo mínimo respecto a las abscisas; significando una autocorrelación espacial mínima. Mientras que con el gráfico de dispersión 6-a' muestra una pendiente negativa de -0.154484. Así, ambos gráficos advierten que no hay una relación espacial significativa entre el área urbana segmentada del año 2004 con respecto a la distribución de las velocidades de deformación; así como con los indicadores de la distribución de los pozos y el volumen de agua extraída. Lo anterior muestra así, a una baja autocorrelación espacial de las variables consideradas y aumentando la dispersión de los valores, lo cual se puede traducir como valores altos rodeados o correlacionados con valores bajos.

Caso contrario ocurre con las regresiones de los dispersogramas 6-b y 6-b' donde se observa una nube de datos menor respecto a 6 a-á, esto debido a la menor

cobertura del área segmentada para la diferencia 2004-2013. Así para 6-b muestra un índice de I Moran de 0.448072, obteniendo la mayor pendiente de la recta con respecto a todas las regresiones lineales estimadas en el estudio; lo cual implica que conforme el ángulo es mayor con respecto al orden de las abscisas, la autocorrelación espacial aumenta de manera exponencial entre las variables o indicadores considerados. Si observamos los 4 cuadrantes que definen al dispersograma con la intención de conocer la posición de la

Figura 6. Dispersogramas a partir de la regresión bivariada de I Moran entre la velocidad de deformación promedio anual con respecto al cálculo la densidad de pozos de extracción de agua subterránea por kilómetro cuadrado y el volumen de extracción de agua subterránea a partir de datos publicados por el Registro Público de Derechos del Agua (REPDA) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).



variable respecto a sus vecinos podemos observar que la mayoría de los datos se concentran en los cuadrantes superior-derecho e inferior-izquierdo evidenciando una alta correlación espacial entre la velocidad promedio de deformación (recordando que el 76% de los puntos PS coincidentes con el área de crecimiento corresponden a rangos de mediana y mayor velocidad promedio de subsidencias del terreno que oscilan entre los 40 y 83mm/año) y el volumen de agua subterránea que se extrae del Valle de Toluca a profundidades menores a los 300m. Por su parte el dispersograma 6-b' muestra un grado de asociación positivo pero menor con respecto a 6-b con un índice de 0.109565, lo cual implica que los valores ubicados en los cuadrantes superior-izquierdo e inferior-derecho se encuentran por debajo de la media de la variable (velocidad promedio de deformación). Lo que a su vez significa que los valores altos de velocidad de deformación se encuentran rodeados por valores de baja densidad de pozos de extracción.

De esta forma se evidencia que, una condicionante para conocer la relación espacial entre los procesos de subsidencia y el crecimiento urbano (y discontinuo urbano) fue la estimación del área segmentada asociada a la razón de cambio para el periodo considerado 2004-2013, ya que como se mencionó anteriormente; el área segmentada para el año 2004 incluye la mayoría de los puntos asociados a subsidencias considerando todos los rangos de velocidad de deformación. Mientras que para el área asociada a crecimiento urbano y discontinuo urbano incluye en su mayoría los puntos de deformación del terreno asociadas al mayor rango de velocidad de deformación entre -45 y 83 mm/año. Encontrando una relación espacial y temporal directa entre procesos de subsidencia y crecimiento urbano para el sector norte-noreste-este principalmente.

CONCLUSIONES

La zona metropolitana del VT se encuentra definida por un proceso de conurbación de estructura de flujos y relaciones entre poblaciones que conforman el área urbana, particularmente cuando estas áreas urbanizadas se van incrustando en espacios libres constituidos por suelos agrícolas principalmente; definidos así en este trabajo como discontinuo urbano. Este tipo de procesos se han registrado también en la zona norte, noroeste y este, de la zona metropolitana, coincidiendo con el crecimiento urbano y discontinuo urbano del periodo 2004-2013 para usos industriales y habitacionales de las localidades como San Pedro Autopan, San Miguel Totoltepec y la zona Industrial de Lerma. Lo anterior ha causado una sobre explotación del acuífero para su uso en los procesos productivos y de consumo, que aunado a la perforación de pozos para abastecer a la Ciudad de México ha causado procesos de abatimiento del acuífero; dando lugar a subsidencias del terreno causando daños en las construcciones y equipamiento urbano principalmente.

Con la finalidad de estudiar este fenómeno, se realizó una correlación espacial entre la razón de cambio del crecimiento urbano y la velocidad promedio de subsidencia

del suelo aplicando una técnica PS para la zona de estudio. Debido a la problemática de mezcla espacial de píxeles asociados intersticios urbano se empleó el método de Análisis de Componente Independiente (ACI) para una segmentación sin ambigüedades de la zona de interés; obteniendo así una tendencia de crecimiento de hasta el 83% hacia la zona norte-noreste-este, que a su vez coincide con la mayor concentración de puntos PS con velocidades mayores a los 40mm/año. Se empleó la autocorrelación espacial de I Moran para validar la relación entre estos dos fenómenos incluyendo indicadores asociados con la sobreexplotación del acuífero como la densidad de pozos y el volumen de extracción. Así, se obtuvo una correlación espacial directa entre las velocidades de subsidencia mayores a 40mm/año y el volumen de extracción de pozos para el área asociada al crecimiento urbano y discontinuo urbano para el periodo considerado; así como una correlación mínima o negativa con respecto a la densidad de pozos y volumen de extracción para el área urbana segmentada para el año 2004. Lo anterior indica que el área de crecimiento urbano y discontinuo urbano de la razón de cambio 2004-2013 se asocia con los mayores rangos de velocidad de subsidencia del terreno para el sector norte-noreste-este; lo que es un indicativo que la subsidencia del terreno medida por el radar es una respuesta ante la demanda de extracción de agua del AVT para el crecimiento urbano habitacional, equipamiento, servicios y actividades industriales en el VT. Este tipo de método podría ser aplicado en otras áreas urbanas de estudio que presenten asociaciones espaciales como las aquí discutidas que evidencien problemáticas con la sobreexplotación de los acuíferos circundantes; de modo tal que pueda ser en su conjunto una herramienta útil para la toma de decisiones por parte de las autoridades locales y municipales.

Agradecimiento

Agradecemos a la Estación Satelital Nueva Generación (ERMEX-NG) de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SIAP) por proporcionar imágenes de la constelación SPOT.

BIBLIOGRAFÍA

ARIAS, P. 2010. De ciudad a metrópoli, en Urquídez, O. (Coord.): **La reinención de la metrópoli**. Algunas propuestas. Zapopan: El Colegio de Jalisco, pp. 25-52.

BASTIDA, M. 2009. Crisis del agua en el Valle de Toluca. Repercusiones socio ambientales por el trasvase, En: *el 53 Congreso Internacional de Americanistas, Simposio: "El Acceso al Agua en América Latina: Historias, Actualidad y Perspectivas"*. México, UNAM.

BIRJANDI, P.; DATCU, M. 2009. ICA based visual words for describing under meter high resolution satellite images. In: *Proceedings IGARSS 2009. IEEE. IGARSS 2009*. Cape Town, South Africa, pp. 12-17.

CALDERHEAD, A.; THERRIEN, R.; RIVERA, A.; MARTEL, R.; GARFIAS, J. 2011. Simulating Pumping-Induced Regional Land Subsidence with the Use of InSAR and Field Data in the Toluca Valley, Mexico. *Advances in Water Resources*, 34, pp.83-97. DOI: 10.1016/j.advwatres.2010.09.017

Common, P. 1994., Independent component analysis, a new concept?. *Signal Processing*, 36, pp. 287-314.

CONAGUA-COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA., 2009. Atlas del agua en México 2009. Distrito Federal: CONAGUA.

DAVILA-HERNANDEZ, N.; MADRIGAL, D.; EXPOSITO, J.L.; ANTONIO, X. 2014. Multi-Temporal Analysis of Land Subsidence in Toluca Valley (Mexico) through a Combination of Persistent Scatterer Interferometry (PSI) and Historical Piezometric Data. *Advances in Remote Sensing*, 3, pp. 49-60.

DIEZ, A. 2010. **Alternativas de administración racional de recursos hídricos en el acuífero sometido a sobreexplotación: Valle de Toluca**. Tesis de Doctorado, Toluca: Universidad Autónoma del Estado de México.

FERRETTI, A.; PRATI, C.; ROCCA, F. 2000. Nonlinear Subsidence Rate Estimation Using the Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38, pp. 2202-2012. <http://dx.doi.org/10.1109/36.868878>.

FERRETTI, A.; PRATI, C.; ROCCA, F. 2001. Permanent Scatterers in SAR Interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39, pp. 8-20. DOI: 10.1109/36.898661.

GEM-GOBIERNO DEL ESTADO DE MÉXICO. 2005. **Plan Regional de Desarrollo Urbano del Valle de Toluca**. Toluca: Gobierno del Estado de México.

INEGI; SEDESOL; CONAPO., 2012. **Delimitación de las zonas metropolitanas de México 2010**. Distrito Federal: AUTOR.

KAUFMAN, Y.; WALD, A.; REMER, L.; GAO, B.; LI, R.; FLYNN, L. 1997. The MODIS 2.1-mm Channel-Correlation with Visible Reflectance for Use in Remote Sensing of Aerosol. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35, pp. 1286-1298.

LIRA, J. 2002. **Introducción al tratamiento digital de imágenes**. Distrito Federal: Instituto Politécnico Nacional, pp.306.

LÓPEZ, P.; DOIN, M.; TUPIN, F.; BRIOLE, P.; NICOLAS, J. 2009. Time Series Analysis of Mexico City Subsidence Constrained by Radar Interferometry. *Journal of Applied Geophysics*, pp. 69, 1-15. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jappgeo.2009.02.006>.

MORAN, P. 1948. The interpretation of statistical maps. *Journal of the Royal Statistical Society*, 10, pp. 243-251.

NÚÑEZ MIRANDA, B. 2010. Introducción. en Urquidez, O. (Coord.). **La reinvencción de la metrópoli. Algunas propuestas.** Zapopan: El Colegio de Jalisco, pp. 17-24.

ONU; SEDESOL., 2011. **Estado de las ciudades en México 2011.** Distrito Federal.

© Norma Dávila-Hernández, Brisa Violeta Carrasco Gallegos y Xanat Antonio Némiga

Dávila Hernández, N.; Carrasco Gallegos, B.V. Némiga, X.A. 2014. Crecimiento urbano y su impacto espacial en los procesos de subsidencia en el valle de Toluca-México a partir de imágenes satelitales. ***Geografía y Sistemas de Información Geográfica***. (GESIG-UNLU, Luján). Año 6, N° 6, Sección I: 226-241. On-line: www.gesig-proeg.com.ar

Recibido: 18 de noviembre de 2014

Aprobado: 23 de diciembre de 2014