

# ¿Hacia dónde crecerá la ciudad de San Luis Potosí (México) después de 2009?

**Daniela Amuzurrutia-Valenzuela.** Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, México.

**Carlos Aguirre-Salado.** Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, México.

**Guillermo Sánchez-Díaz.** Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, México.

**RESUMEN** | La zona metropolitana de San Luis Potosí (ZMSLP) se localiza estratégicamente entre las ciudades más pobladas de México: la capital del país (México, D.F.), Guadalajara y Monterrey; además, es parte de la ruta de migración de personas provenientes de países centroamericanos hacia Estados Unidos. Esto ha ocasionado un vertiginoso crecimiento industrial y de servicios durante los últimos veinte años. Para conocer la susceptibilidad de urbanización, se desarrolló un modelo de regresión logística basado en variables espacialmente explícitas generadas a partir de imágenes de satélite Landsat (1990 y 2009) e información geoespacial. De las variables examinadas, la distancia a la zona industrial, la elevación y el costo del uso del suelo tuvieron un comportamiento estadísticamente significativo. Se presentan las zonas de susceptibilidad de crecimiento urbano como una herramienta de planeación territorial a nivel regional. El modelo estadístico fue validado satisfactoriamente mediante un algoritmo de validación cruzada con 10 iteraciones.

**PALABRAS CLAVE** | crecimiento urbano, ordenamiento territorial, planificación territorial.

**ABSTRACT** | *The metropolitan zone of San Luis Potosí (ZMSLP) is strategically located between the most crowded cities of Mexico: the nation's capital (Mexico City), Guadalajara and Monterrey. Furthermore, it is part of the migration route of people coming from Central American countries to the United States. This situation has caused a vertiginous industrial/services infrastructure development during the last twenty years. In order to know the susceptibility to urban growth, a logistic regression analysis was carried out. Urban growth was determined using multivariate-Landsat 5 tm imagery by integrating geospatial data layers. From the variables reviewed, the distance of the industrial zone, the elevation and the land cost have an important statistical behavior. Susceptibility zones to urban growth are presented as a tool for territorial planning at regional level. The statistical model was successfully validated using a cross-validation 10-fold algorithm.*

**KEYWORDS** | *urban growth, spatial planning, territorial planning.*

Recibido el 5 de agosto de 2013, aprobado el 13 de junio de 2014

E-mail: Daniela Amuzurrutia-Valenzuela, anubis\_yue96@hotmail.com | Carlos Aguirre-Salado, carlos.aguirre@uaslp.mx | Guillermo Sánchez-Díaz, guillermo.sanchez@uaslp.mx

## Introducción

Según el Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de las Naciones Unidas, la población mundial total creció de 2.532 millones de habitantes en 1950 hasta 6.895 millones en 2010, lo que significa un 172,3% en sesenta años, mientras que el porcentaje de la población urbana a nivel mundial se incrementó de 29,4% en 1950 hasta 51,6% en 2010. Para el caso de México, la población total creció de 27,8 millones de habitantes en 1950 hasta 113,4 millones de habitantes en 2010, lo que significa un 307,9% en sesenta años, mientras que el porcentaje de la población urbana en México aumentó de 42,7% en 1950 hasta 77,8% en 2010 (United Nations, 2012). El crecimiento industrial, de servicios y, por ende, el económico de las ciudades ha sido una de las premisas fundamentales para fomentar la migración de personas del medio rural al urbano en búsqueda de mejores oportunidades de vida, resultando en una de las principales causas de los cambios en las proporciones señaladas.

La importancia de los centros urbanos como generadores de plusvalía es indiscutible. Por ello, el estudio del crecimiento urbano es un tema básico para planear el desarrollo sustentable de una ciudad. Dentro de las condiciones que se requieren para considerar que el crecimiento de una ciudad es el adecuado, se encuentra el mantener, en la medida de lo posible, un crecimiento altamente compacto para conservar el tamaño de la ciudad de manera reducida; por otro lado, la tasa de crecimiento urbano no debería exceder la tasa de crecimiento poblacional; y finalmente, no debería afectar los intereses y necesidades de la población, así como el ambiente, tanto en el presente como en el futuro. El satisfacer estas expectativas es la base para poder llegar a un crecimiento urbano sustentable e inteligente, sin caer en el hacinamiento urbano. Es comúnmente sabido que para lograr la sustentabilidad, las ciudades tienen que mantenerse en un equilibrio entre la economía, el crecimiento de la población, la infraestructura y servicios, contaminación y residuos e incluso ruido, de manera que el sistema urbano se desarrolle en armonía y amigablemente con el ambiente (Barredo & Demicheli, 2003).

La estimación de los impactos futuros de los planes y políticas existentes sobre el uso de suelo, así como la consideración de escenarios de política y planeación alternativas para la minimización de impactos, es particularmente importante para los planeadores regionales y urbanos. Las consecuencias de la planeación inadecuada en los países en vías de desarrollo son del interés tanto de los investigadores como de los políticos encargados de legislar sobre el desarrollo sustentable (Barredo & Demicheli, 2003). En este sentido, dadas las implicaciones del crecimiento urbano en esferas ambientales, sociales y económicas a nivel tanto global como local, su estudio ha cobrado una gran relevancia. Esto ha sido posible, por dos motivos: a) la existencia de diferentes conjuntos de información geoespacial generados por organismos nacionales e internacionales, como un esfuerzo global para contar con datos que apoyen mejor la toma de decisiones sobre temas territoriales; y b) el desarrollo vertiginoso de la tecnología, que ha permitido procesar de manera eficiente grandes cantidades de información.

Los investigadores han empleado metodologías diversas para monitorear, modelar y predecir el crecimiento urbano, por lo que existe una amplia variedad de fuentes de información sobre la materia. Algunos han utilizado imágenes de baja resolución espacial para seguir el crecimiento de las ciudades a escalas globales (Schneider, Friedl

& Potere, 2010; Zhang & Seto, 2011); o han recurrido a sensores de resolución espacial media para monitorear el crecimiento urbano desde una perspectiva regional (Braimoh & Onishi, 2007; Batisani & Yarnal, 2009; Tewolde & Cabral, 2011), mientras que otros han recurrido a imágenes de muy alta resolución espacial para investigar el crecimiento con un alto nivel de detalle (Aguilera-Benavente, 2006; Gómez-Ángel, 2009). Por su parte, para el caso de la modelación se han empleado diversas metodologías, entre las que destacan la regresión logística (Sohl & Saylor, 2008; Luo & Wei, 2009; García, Santé & Crecente, 2010; Park, Jeon & Choi, 2012; Yu & Du, 2011), la regresión geográficamente ponderada (Luo & Wei, 2009), la regresión múltiple (Su, Xiao & Zhang, 2012), el algoritmo de autómatas celulares (Liu, 2009), las metodologías de análisis multicriterio y multiobjetivo (Gabriel, Faria & Moglen, 2006; Dong, Zhuang, Xu & Ying, 2008), entre otras. Lo común en todas estas investigaciones es la existencia de una profunda investigación empírica para calibrar el modelo que se haya escogido, a fin de obtener estimaciones confiables y validadas.

La ciudad de San Luis Potosí (México) debe su origen a la minería. Los yacimientos de oro y plata encontrados durante la época virreinal contribuyeron a fundar un nuevo centro poblacional. Esto se encuentra documentado en diferentes mapas históricos elaborados desde épocas remotas, como la obra de Galván-Arellano (2006), donde se describe a detalle la evolución de la ciudad desde sus inicios en 1591 con un área de 10,58 hectáreas. Durante la época reciente, en tanto, dos fenómenos han propiciado el crecimiento de la ciudad: el terremoto de la Ciudad de México en 1985, que expulsó a una considerable cantidad de personas, que vieron una posibilidad de desarrollo en la ciudad de San Luis Potosí. Finalmente, la creciente actividad industrial asociada al establecimiento de empresas de diversa índole, ha sido otro de los factores subyacentes que han causado el crecimiento urbano en la ZMSLP.

Es considerando lo anterior que esta investigación se plantea como objetivo principal desarrollar una metodología que sirva para detectar, con base en diversos criterios, las zonas con mayor susceptibilidad de crecimiento urbano, a fin de dar evidencia de las tendencias existentes durante el periodo de análisis, 1990-2009. En este sentido, los objetivos del presente estudio fueron: 1) delimitar el crecimiento urbano del área metropolitana de la ciudad de San Luis Potosí (México) mediante el uso de imágenes de satélite Landsat para el periodo 1990-2009; 2) determinar las variables estadísticamente significativas que han influido en la distribución espacial del crecimiento urbano a través del uso del modelo de regresión logística; 3) modelar espacialmente la susceptibilidad del territorio de crecimiento urbano con base en las variables estadísticamente significativas detectadas en el análisis estadístico; y 4) validar el modelo seleccionado mediante un algoritmo de validación cruzada 10-fold.

## **Materiales y métodos**

### **Área de estudio**

La ZMSLP es el resultado de la fusión de las ciudades de San Luis Potosí y Soledad de Graciano Sánchez. La ciudad se encuentra comunicada tanto en dirección sur-norte como en dirección este-oeste. En el primer caso lo está través de la Carretera 57, que une a la ciudad de México, D.F. con la ciudad de Piedras Negras (frontera

con Estados Unidos); mientras que el segundo caso se refiere a la Carretera 70 transoceánica, que une a Tampico, Tamaulipas (golfo de México) con el puerto de Manzanillo, Colima (océano Pacífico). La ZMSLP se encuentra situada en un valle a 259 kilómetros al noreste de la capital mexicana (México, D.F.) entre las coordenadas 22° 01' 34" - 22° 13' 06" N y 101° 02' 39" - 100° 53' 21" W. La altitud promedio es de 1860 m.s.n.m. Este valle se rodea al noroeste-suroeste por la sierra de San Miguelito, alcanzando elevaciones cercanas a 2860 m.s.n.m.

La ciudad presenta dos grupos climáticos: BWkw (clima árido frío con invierno seco) que se encuentra solamente en la zona nor-noreste de la ZMSLP, mientras que BS<sub>0</sub>kw (clima semiárido frío con invierno seco) se encuentra rodeando el resto de la ciudad y dominando en el valle. La temperatura media anual es de 17 °C, con máxima de 34 °C y mínima de 0 °C. El periodo cálido va de marzo a octubre, mientras que el periodo frío va de noviembre a febrero. La precipitación media anual varía de 350 a 400 milímetros. Este valle se encuentra dentro de la región hidrológica No. 37, "El Salado", caracterizada por un conjunto de cuencas endorreicas en la Región Centro Norte de México. Dentro de la ZMSLP fluyen dos corrientes importantes, el río Santiago y el río Españita. El río Santiago se alimenta de la cuenca correspondiente a la presa San José, mientras que el área de captación hídrica de la cuenca del río Españita corresponde a la presa Cañada del Lobo. Estas dos presas controlan el flujo del escurrimiento hídrico durante la época de lluvia.

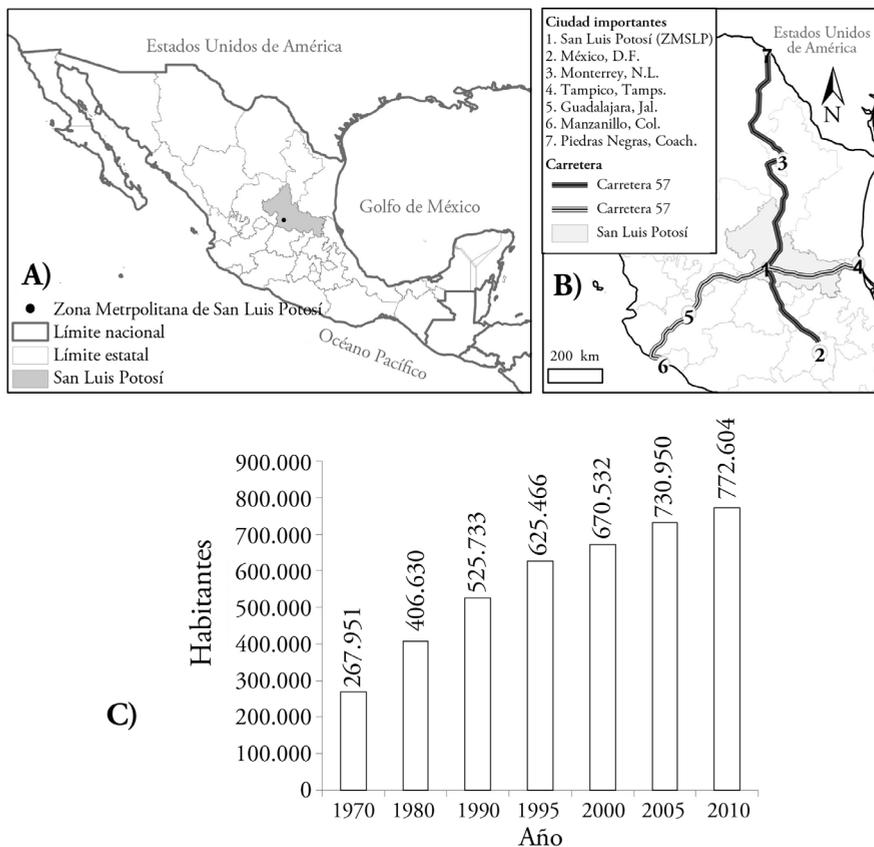
La ZMSLP se encuentra cerca de las tres ciudades más pobladas de la República Mexicana: Ciudad de México (407 km), Guadalajara, Jalisco (367 km) y Monterrey, Nuevo León (511 km). Estas ciudades cuentan con una población de 8,9, 1,4 y 1,1 millones de habitantes, respectivamente (Figura 1A y 1B). Esta condición de cercanía convierte a la ZMSLP en un lugar estratégico para diversas actividades económico-productivas, como la industrial. Varias empresas han ubicado sus plantas industriales en la ZMSLP, como es el caso de General Motors S.A. de C.V., Mabe Leiser S. de R.L. de C.V., Planta Barilla (Complejo Industrial Duque de Hérdez), entre otros, atrayendo mano de obra, no solo del interior del estado sino de otros estados, detonando la actividad productiva y de servicios y, con ello, el crecimiento poblacional de la región. La ZMSLP ha experimentado un crecimiento poblacional constante durante los últimos cuarenta años, que la ha llevado a pasar de una población de 267.951 habitantes en 1970 hasta 772.604 habitantes en 2010 (véase Figura 1C; INEGI, 2011a).

### **Determinación espacial del crecimiento urbano**

El sensor Landsat 5 Thematic Mapper (Landsat 5 TM) fue puesto en órbita el primero de marzo de 1984 por la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio de los Estados Unidos de América (NASA, por sus siglas en inglés). Landsat 5 TM viaja a una altitud de 705 km, con una resolución temporal de 16 días, una resolución espectral de 7 bandas, con una resolución espacial de 30 m en las bandas multiespectrales y de 120 m en el infrarrojo térmico, y con una resolución radiométrica de 8 bits. Se emplearon dos imágenes de satélite Landsat 5 TM con fecha de toma del 16 de marzo de 1990 y 5 de abril de 2009, respectivamente, obtenidas del Global Land Cover Facility, disponible en <http://www.landcover.org>. Tales

imágenes se encontraban co registradas en el sistema de coordenadas UTM, zona 14, datum wgs84. Adicionalmente, se corroboró su calidad geométrica con archivos vectoriales de la traza urbana del área conurbada de San Luis Potosí, generados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Se construyeron imágenes en falso color (RGB) con la banda 5 (infrarrojo medio, 1,55-1,75 micras), la banda 4 (infrarrojo cercano, 0,76-0,90 micras), y la banda 2 (verde, 0,52-0,60 micras), respectivamente, para resaltar espectralmente los diferentes rasgos dentro de las imágenes de satélite, en particular la clase temática de uso urbano (Figura 2).

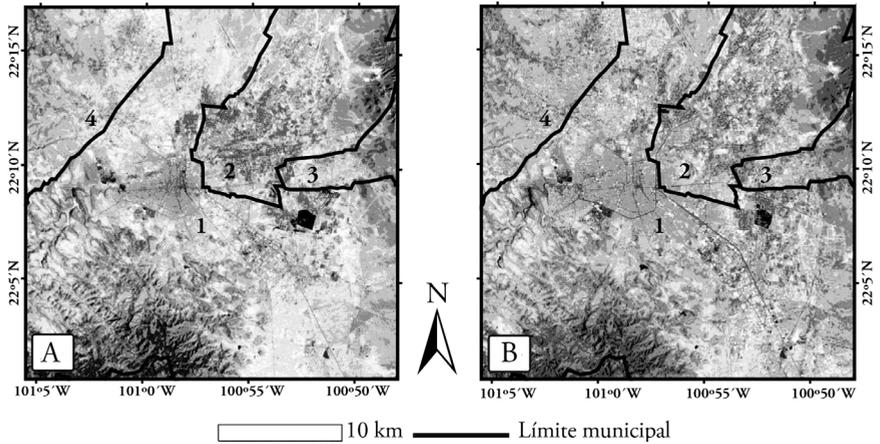
**FIGURA 1** | A) Localización de la Zona Metropolitana de San Luis Potosí (área de estudio); B) conexión carretera y ciudades importantes y C) crecimiento poblacional de la ZMSLP



FUENTE ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DEL INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y GEOGRAFÍA (INEGI, 2011A)

Dado que la naturaleza de este trabajo fue el mapeo del crecimiento urbano, las clases temáticas empleadas fueron: urbano y no urbano. Para ello, se realizó una fotointerpretación sobre la imagen de satélite para mapear ambas categorías temáticas. El mapa obtenido para la fecha 2009 fue editado con la ayuda de 100 puntos verificados en campo; adicionalmente, se realizó una segunda corrección para este mapa utilizando las imágenes de alta resolución espacial disponibles en Google Earth, para definir con mayor detalle el polígono de la mancha urbana. Se determinó la tasa anual de cambio con la siguiente ecuación:  $TC = ((A_2/A_1) ^ (1/n)-1) \times 100$ , donde TC = Tasa de cambio (%),  $A_1$  = Área en el año 1990,  $A_2$  = Área en el año 2009, n = número de años en el periodo de análisis (Hirales-Cota, Espinoza-Ávalos, Schmook, Ruiz-Luna & Ramos-Reyes, 2010). El signo de la tasa de cambio se interpreta ya sea como ganancia (+) o pérdida (-). Los archivos vectoriales de la mancha urbana por cada uno de los años se intersectaron espacialmente para conocer las zonas que crecieron durante el periodo de análisis. La evidencia del crecimiento urbano, obtenida del cruce de los mapas generados anteriormente, fue convertida a formato raster booleana con un tamaño de píxel de 30 m, dando como resultado la variable de interés. Se empleó una resolución de 30 m para estandarizar las variables explicatorias respecto a la resolución espacial en que se encuentran las imágenes de satélite.

**FIGURA 2** | Imágenes de satélite Landsat 5 TM empleadas. Falso color compuesto con las bandas 5,4,2. A) Año 1990 y B) Año 2009



**FUENTE** ELABORACIÓN PROPIA CON IMÁGENES MULTIESPECTRALES OBTENIDAS DEL FONDO DE COBERTURA TERRESTRE MUNDIAL (GLOBAL LAND COVER FACILITY). LOS NÚMEROS DENTRO DE LA IMAGEN REPRESENTAN LOS DIFERENTES MUNICIPIOS: 1. SAN LUIS POTOSÍ, 2. SOLEDAD DE GRACIANO SÁNCHEZ, 3. CERRO DE SAN PEDRO Y 4. MEXQUITIC DE CARMONA

### Modelo de regresión logística

Los modelos estadísticos permiten encontrar la relación funcional entre las variables explicatorias y la variable de respuesta. La regresión logística se emplea cuando la variable dependiente presenta dos opciones, ocurrencia o ausencia; es decir, de tipo binario. Entonces modela la probabilidad o grado de ocurrencia de la variable de interés con base en variables explicatorias, generando estimaciones que varían entre 0 y 1 (Gómez-Ángel, 2009). Entre las bondades de este modelo estadístico destaca el no requerir supuestos de normalidad en los datos u homoscedasticidad. Las aplicaciones de este modelo reportadas en la literatura son variadas, destacando estudios de deforestación (Etter, McAlpine, Wilson, Phinn & Possingham, 2006; Carr et al., 2008), cambio de uso de suelo (Fang, Gertner, Sun & Anderson, 2007; García, Santé & Crecente, 2010), mientras que algunos otros enfocan sus investigaciones al análisis del crecimiento de las ciudades (Batisani & Yarnal, 2009; Gómez-Ángel, 2009). El modelo de regresión logística empleado es de la siguiente forma:

$$\text{donde, } p(y) = \frac{e^{(\beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \dots + \beta_k X_k)}}{1 + e^{(\beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \dots + \beta_k X_k)}}$$

$p$  = susceptibilidad de crecimiento urbano en términos de probabilidad (0-1);  
 $X_k$  = variables explicativas (de proximidad, sociales, físicas, entre otras);  
 $\beta_k$  = parámetros estimados mediante el método de máxima verosimilitud.

Antes de construir el modelo, se averiguó la presencia de multicolinealidad entre las variables independientes. La multicolinealidad indica si existe una relación lineal entre las variables explicatorias, y que por definición deberían ser independientes. La existencia de multicolinealidad trae como consecuencia un incremento en el error estándar de los coeficientes, aumentando la probabilidad de generar errores en las estimaciones, dificultando la interpretación de los resultados (García, Chagolla & Noriega, 2006). Una forma de detectarla es mediante el análisis del factor de inflación de la varianza (FIV), que mide el incremento en la varianza del coeficiente de regresión simulando que no existe la presencia de la multicolinealidad, y cuanto mayor sea, mayor será la multicolinealidad (Rivera-Cervantes, 2009). Como indicador de la bondad de ajuste del modelo, se empleó el parámetro estadístico ROC (Relative Operating Characteristic). Este indicador mide la exactitud de la predicción del modelo y toma valores en un rango de 0,5 a 1. Si el valor se encuentra entre 0,5-0,6, el modelo es deficiente. Si el valor está entre 0,6-0,7, el modelo es regular. Si el valor se encuentra entre 0,75-0,9, el modelo es bueno. Si el valor está entre 0,9-0,95, el modelo es muy bueno. Si el valor está entre 0,95-1, el modelo es excelente (Fang, Gertner, Sun & Anderson, 2005; Aguilera-Benavente, 2006; Braimoh & Onishi, 2007; Gómez-Ángel, 2009).

Las variables explicatorias empleadas para modelar la susceptibilidad de crecimiento se agruparon en: 1) distancia, 2) topografía y 3) otras, que incluyen el costo del suelo, el contenido de flúor en el acuífero, la densidad poblacional, entre otras (Cuadro 1) (Figura 3). Las variables correspondientes al grupo 1 se obtuvieron mediante la digitalización de los diferentes rasgos geográficos de interés y

posteriormente determinando la distancia (m) entre el rasgo geográfico de interés hacia todos los píxeles de la imagen. La resolución espacial fue estandarizada a 30 m. Dentro de las variables del grupo 1, se encuentra la distancia al centro histórico, tanto del municipio de San Luis Potosí como del de Soledad de Graciano Sánchez (m) (García, Santé & Crecente et al., 2010); la distancia a la carretera principal (Carretera 57); distancia a la zona industrial (m), representada con el centroide de la zona industrial; distancia a las principales universidades públicas y privadas (Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Universidad Politécnica de San Luis Potosí, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Universidad del Valle de México, Universidad del Centro de México, Universidad Cuauhtemoc, entre otras) que se encuentran dentro de la ZMSLP.

Las variables explicatorias relacionadas con la topografía del terreno incluyen la elevación y la pendiente. La elevación (m) consiste en la altura sobre el nivel medio del mar de un punto cualquiera en el territorio, mientras que la pendiente (%) es el grado de inclinación del terreno. Estas variables se generaron a partir de los modelos digitales de elevación del INEGI que se encuentran en la plataforma electrónica del Continuo de Elevaciones Mexicano. Varios investigadores han recomendado su uso en diferentes modelos estadísticos; para el caso de la elevación se encuentran Baldwin, Trombulak, Anderson & Woolmer (2007), Cifuentes-Ruiz (2009), entre otros; mientras que para el caso de la pendiente se encuentran Serra, Sauri & Pons (2005), Etter et al. (2006), García, Santé & Crecente et al. (2010) y Kirk, Bolstad & Manson (2012), entre otros.

Dada la diversidad de las variables incluidas en el tercer grupo, que van desde económicas y sociales hasta, incluso ambientales, se decidió etiquetarlas como "otras". Estas variables incluyen el costo del suelo que se obtuvo a partir del plano de uso del suelo (2004) generado por la presidencia municipal de San Luis Potosí 2000-2003. Los valores asignados fueron de 1 a 4 para referirse al costo de uso de suelo, de bajo a alto, respectivamente. La densidad de población (habitantes/km<sup>2</sup>) se generó interpolando datos de INEGI a nivel localidad (INEGI, 2011b). La disminución del nivel de agua en el acuífero (m) se determinó como el inverso de la diferencia del nivel estático de los pozos georreferenciados durante el periodo de 1998 a 2005 por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). El contenido de flúor (mg/l) se obtuvo a partir de muestras tomadas en 127 pozos de agua localizados en el área de influencia de la ZMSLP (Landín, 2006). Estas últimas tres variables se obtuvieron en puntos que fueron interpolados mediante el método de ponderación inversa a la distancia espacial. Para descubrir alguna tendencia espacial de urbanización con base en la dirección cardinal, se construyeron dos nuevas variables mediante un barrido de forma horizontal y vertical para obtener las coordenadas X e Y, respectivamente. Las variables explicatorias fueron estandarizadas aplicando el logaritmo natural  $\ln(X_k + 1)$ , para minimizar los efectos negativos que pudieran tener en el ajuste del modelo al utilizar diferentes escalas de medición (Pineda, Bosque, Gómez & Plata, 2009).

Para asegurar que las observaciones de la muestra fueran independientes y minimizar el efecto de autocorrelación espacial en la estimación de los parámetros del modelo, una vez estandarizadas las variables explicatorias, se realizó un muestreo

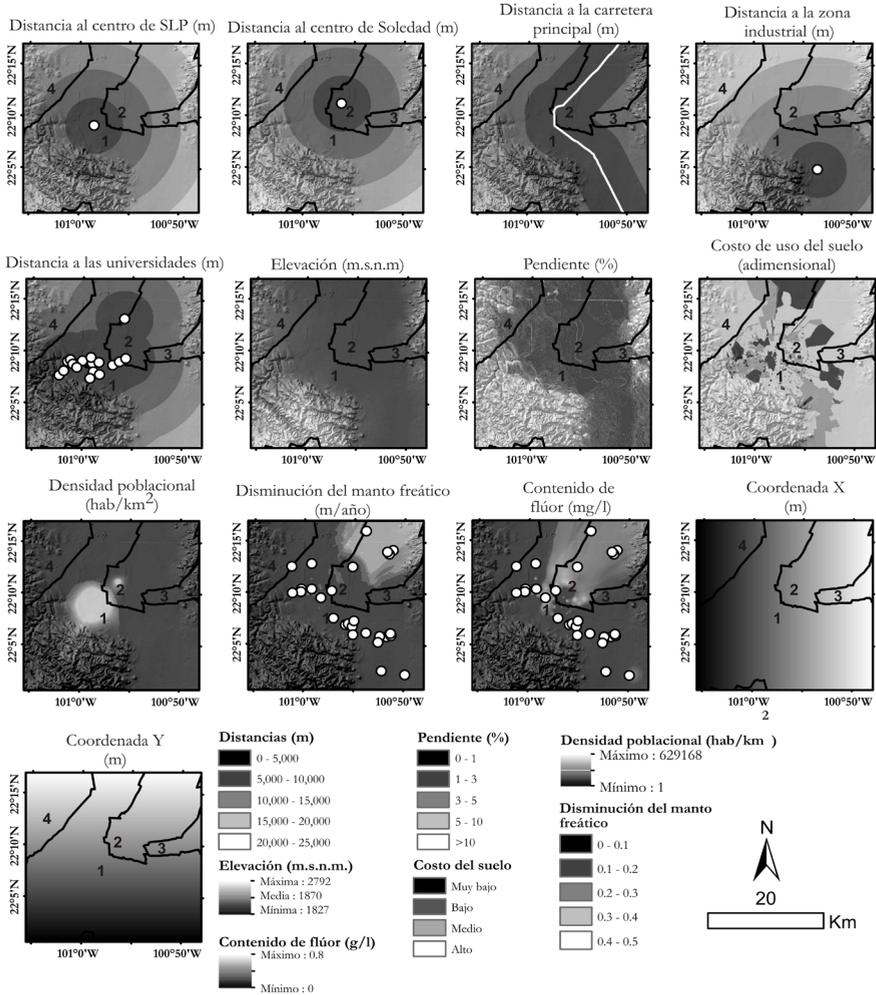
sistemático a cada 420 m de distancia para extraer 5.000 observaciones (Figura 4) (Sánchez-Peña, 2006). Con la muestra obtenida, se realizó el análisis de regresión logística para modelar estadísticamente la variable dependiente del crecimiento urbano (binaria, 0 sin crecimiento y 1 con crecimiento) versus todas las variables explicatorias. La selección de las variables explicatorias se efectuó con base en el factor de inflación de la varianza (VIF, por sus siglas en inglés), que debió ser menor a 5, y con el valor de probabilidad, considerando una significancia estadística de  $\alpha=0,01$ . Como indicador de bondad de ajuste se empleó el área bajo la curva de la característica de operación relativa (curva ROC, por sus siglas en inglés). Este indicador revela el potencial predictivo del modelo y los valores posibles varían entre 0,5 y 1. Este método estima las probabilidades predichas comparándolas con los valores observados sobre el rango completo de probabilidades predichas (Batisani & Yarnal, 2009). El modelo final se obtuvo con variables significativas  $\alpha=0.05$  y sin presencia de colinealidad.

**CUADRO I | Variables explicatorias empleadas**

GRUPO	NO	VARIABLE	CLAVE	TIPO	FUENTE
1. Distancia	X <sub>1</sub>	Distancia al centro de SLP (m)	DCENSLP	Continua	Propia
	X <sub>2</sub>	Distancia al centro de SGS (m)	DCENSOL	Continua	Propia
	X <sub>3</sub>	Distancia a la carretera principal (Carr. 57) (m)	DCARR57	Continua	Propia
	X <sub>4</sub>	Distancia a la zona industrial (m)	DZINDUST	Continua	Propia
	X <sub>5</sub>	Distancia a las universidades (m)	DUNIVER	Continua	Propia
2. Topografía	X <sub>6</sub>	Elevación (m)	TELEV	Continua	INEGI
	X <sub>7</sub>	Pendiente (%)	TPEND	Continua	INEGI
3. Otras	X <sub>8</sub>	Costo del suelo (sin unidades)	OCOSTUS	Continua	Ayuntamiento*
	XZ <sub>9</sub>	Densidad poblacional (habitantes/km <sup>2</sup> )	ODENSPOB	Continua	INEGI
	XZ <sub>10</sub>	Disminución del nivel de agua en el acuífero (m/año)	ODISPAGUA	Continua	CONAGUA
	XZ <sub>11</sub>	Contenido de flúor (mg/l)	OCFLUOR	Continua	CONAGUA
	XZ <sub>12</sub>	Coordenada UTM X (m)	OXUTM	Continua	Propia
	XZ <sub>13</sub>	Coordenada UTM Y (m)	OYUTM	Continua	Propia

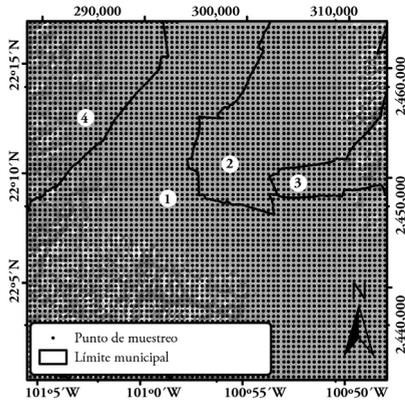
\*Ayuntamiento del municipio de San Luis Potosí.

**FIGURA 3 | Detalle espacial de las variables explicatorias empleadas**



FUENTE ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS OBTENIDOS DE DEPENDENCIAS GUBERNAMENTALES DESCRITAS EN EL CUADRO I

FIGURA 4 | Diseño sistemático para la obtención de la muestra (5.000 puntos) para el entrenamiento del modelo de regresión logística



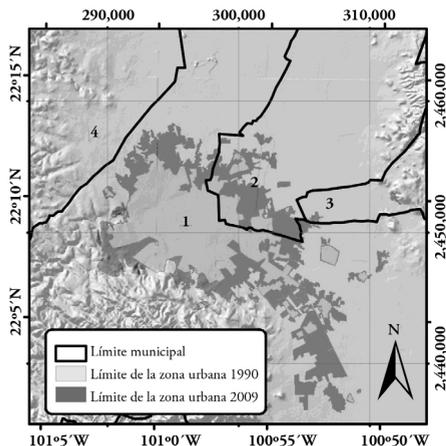
FUENTE ELABORACIÓN PROPIA. LOS NÚMEROS DENTRO DE LA IMAGEN REPRESENTAN LOS DIFERENTES MUNICIPIOS: 1. SAN LUIS POTOSÍ, 2. SOLEDAD DE GRACIANO SÁNCHEZ, 3. CERRO DE SAN PEDRO Y 4. MEXQUITIC DE CARMONA

## Resultados

### Crecimiento urbano

En la Figura 5 se aprecia el detalle espacial de la variable de interés empleada en el análisis de regresión (crecimiento urbano), que se obtiene mediante la intersección espacial de las áreas de cada año de análisis. Para el año 1990 se registró un área urbana de 7.713,28 ha, mientras que para el año 2009 el área fue de 15.992,71 ha; esto genera un crecimiento de 8.279,43 ha en 19 años. La ZMSLP creció un 107,3% respecto al área inicial en 19 años. La tasa anual de cambio calculada para este periodo fue de 3,91%.

FIGURA 5 | Crecimiento urbano registrado durante el periodo de 1990 a 2009 en la ZMSLP



FUENTE ELABORACIÓN PROPIA. LOS NÚMEROS DENTRO DE LA IMAGEN REPRESENTAN LOS DIFERENTES MUNICIPIOS: 1. SAN LUIS POTOSÍ, 2. SOLEDAD DE GRACIANO SÁNCHEZ, 3. CERRO DE SAN PEDRO Y 4. MEXQUITIC DE CARMONA

### Selección de variables

En el Cuadro 2 se presentan los valores obtenidos para los diferentes parámetros estadísticos como parte del proceso de selección de variables explicatorias. En la primera regresión se probaron todas las variables explicatorias de manera simultánea (13 variables) para detectar aquellas que fueran significativas (valor de probabilidad <0,01) y no tuviesen indicios de colinealidad (factor de inflación de la varianza <5). Las variables que aprobaron este examen fueron cinco e incluyen: la distancia a la zona industrial, la elevación sobre el nivel del mar, el costo del uso del suelo, la densidad poblacional y la coordenada x UTM. Tales variables se volvieron a probar en una segunda regresión, donde aquella que no fue estadísticamente significativa fue la densidad poblacional. En la tercera regresión se estimaron los parámetros del modelo final:

$$p(y) = \frac{e^{(1115.5 - 1.8656X_4 - 43.3291X_6 + 1.1058X_8 - 61.4791X_{12})}}{1 + e^{(1115.5 - 1.8656X_4 - 43.3291X_6 + 1.1058X_8 - 61.4791X_{12})}}$$

donde

$P(y)$  = probabilidad de cambio a uso de suelo urbano;

$X_4$  = distancia a la zona industrial,  $X_6$  = Elevación,  $X_8$  = Costo de uso del suelo;

$X_{12}$  = coordenada X UTM.

La retención de las variables que tienen un comportamiento estadístico significativo genera un modelo más eficiente. Para interpretar el modelo resultante, los signos de las variables explicatorias indican su efecto en la probabilidad, ya sea directo o inverso. En la Figura 6 se ilustran los efectos parciales de las variables significativas en la variable de respuesta del modelo final. Por ejemplo, para el caso del costo del uso del suelo, que presenta un signo positivo, se observa una relación de incremento; aquellos lugares con mayor costo de uso del suelo presentan una mayor probabilidad de crecimiento urbano, mientras que las variables con signo negativo exhiben un comportamiento inverso. Aquellos lugares que se encuentren a una distancia a la zona industrial menor a 4.200 m, con una elevación sobre el nivel del mar menor a 1.914 m, y espacialmente ubicados hacia el oeste de la ciudad, presentan una mayor probabilidad de crecimiento urbano. El valor que se observa en la Figura 6 corresponde al límite de la variable explicatoria donde la probabilidad de crecimiento urbano supera el 0,5. Por otro lado, el indicador de la bondad de ajuste del modelo determinado por el área bajo la curva ROC obtenida para el modelo final fue de 0,86, considerándose como bueno (Fang, Gertner, Sun & Anderson, 2005). En la Figura 7 se muestra la curva ROC, que ilustra el desempeño predictivo del modelo de regresión logística. La variable especificidad evalúa los casos negativos verdaderos, aquellos donde se predice una nula y comprobada susceptibilidad de crecimiento urbano a partir de los datos de la muestra. La variable sensibilidad describe los casos positivos verdaderos; es decir, aquellos en los que se predice una susceptibilidad positiva y comprobada de crecimiento urbano. Al analizar los cuadrantes de la curva, se puede apreciar una ligera tendencia de estimación optimista, es decir, cercana a 1.

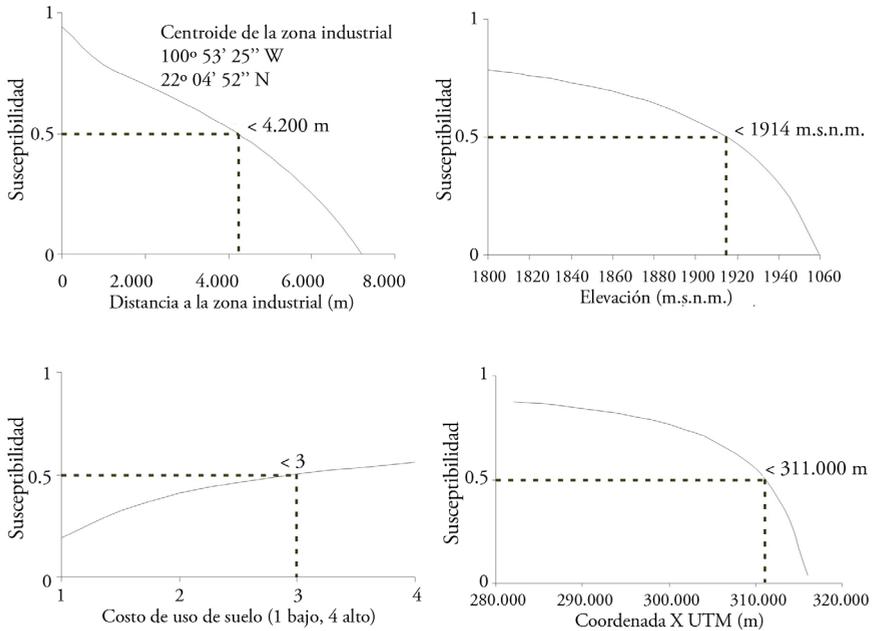
CUADRO 2 | Parámetros de regresión obtenidos para la selección del modelo de regresión logística

N°	VARIABLE	REGRESIÓN 1			REGRESIÓN 2			REGRESIÓN 3		
		ESTIMADOR	P-VALUE	VIF	ESTIMADOR	P-VALUE	VIF	ESTIMADOR	P-VALUE	VIF
	Interceptada	11204,3	<0,0001		1099,9	<0,0001		1115,5	<0,0001	
1	DCENSLP	0,2243	0,4117	7,78						
2	DCENSOL	-2,4956	<0,0001	5,15						
3	DCARR57	0,118	0,1424	3,54						
4	DZINDUST	-1,0234	<0,0001	4,7	-1,8566	<0,0001	1,359	-1,8656	<0,0001	1,315
5	DUNIVER	-0,1034	0,3655	4,47						
6	TELEV	-48,7342	<0,0001	4,91	-43,0496	<0,0001	1,417	-43,3291	<0,0001	1,417
7	TPEND	-0,1238	0,2029	3,31						
8	COSTUS	1,0963	<0,0001	1,21	1,1104	<0,0001	1,087	1,1058	<0,0001	1,085
9	DENSPOB	-0,1985	<0,0001	2,2	0,0177	0,4037	1,151			
10	DISPAGUA	9,1409	0,1163	5,14						
11	CFLU	-2,6508	0,0422	5,41						
12	XUTM	-88,2315	<0,0001	3,32	-60,4267	<0,0001	1,873	-61,4791	<0,0001	1,679
13	YUTM	-659,1	<0,0001	5,29						

P-VALUE: valor de probabilidad; VIF: factor de inflación de la varianza

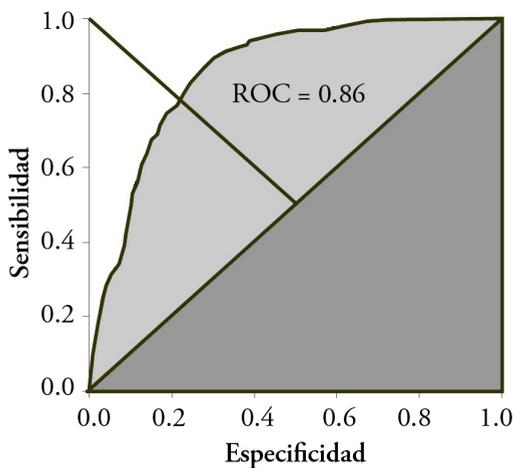
FUENTE ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS OBTENIDOS DEL PROCESAMIENTO DEL MODELO DE REGRESIÓN LOGÍSTICA

**FIGURA 6 | Efectos parciales de las variables significativas en el modelo de regresión logística para estimar la susceptibilidad de crecimiento urbano en la ZMSLP**



FUENTE ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS OBTENIDOS DEL PROCESAMIENTO DEL MODELO DE REGRESIÓN LOGÍSTICA

**FIGURA 7 | Prueba de bondad de ajuste del modelo de regresión logística mediante la curva ROC**



FUENTE ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS OBTENIDOS DEL PROCESAMIENTO DEL MODELO DE REGRESIÓN LOGÍSTICA

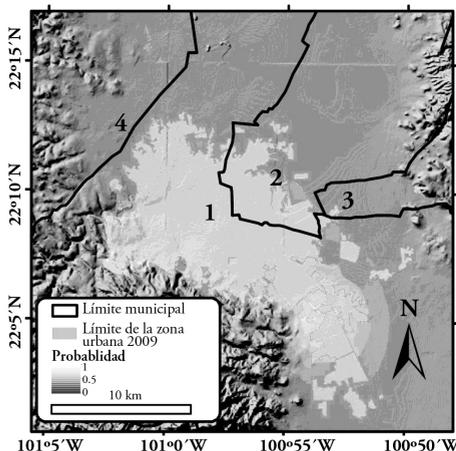
### Predicción del crecimiento urbano

El supuesto primordial de esta metodología es que las relaciones espaciales detectadas entre el crecimiento urbano y los patrones de uso de suelo como variables explicatorias son procesos que permanecen válidos en el futuro. Al evaluar la ecuación obtenida con los parámetros estimados en el análisis de regresión logística, se obtuvo un mapa de susceptibilidad de crecimiento urbano (Figura 8). Los valores más claros expresan lugares que tienen una mayor susceptibilidad. Tanto el área (ha) para cada clase de susceptibilidad de crecimiento urbano, así como una comparación contra el área urbana mapeada en 2009, se presentan en el Cuadro 3. Se puede observar que 261,0 ha (2,8% comparado con el área urbana en 2009) se encuentran en una muy alta susceptibilidad de crecimiento urbano, mientras que 441,7 ha (1,6 % comparado con el área urbana en 2009) se encuentran en una alta susceptibilidad de urbanización. Estas dos clases de susceptibilidad de urbanización ilustran de manera clara la tendencia de crecimiento urbano para aquellas zonas que se encuentran actualmente sin construir.

### Validación del modelo de regresión logística

Se desarrolló un algoritmo de validación cruzada 10-fold para validar el desempeño del modelo de regresión logística. Esta técnica consiste en partir la muestra aleatoriamente en 10 submuestras. En cada fase iterativa, una submuestra es considerada para validación y no se emplea para el cálculo de los parámetros del modelo, mientras que las muestras restantes sí son empleadas para la generación del modelo. Esta fase iterativa se repite 10 veces. En la Figura 9 se observan los valores de la curva ROC obtenidos para cada fase iterativa; estos valores varían entre 0,83 y 0,91 con una media de 0,86.

FIGURA 8 | Susceptibilidad del crecimiento urbano con el modelo de regresión logística obtenido

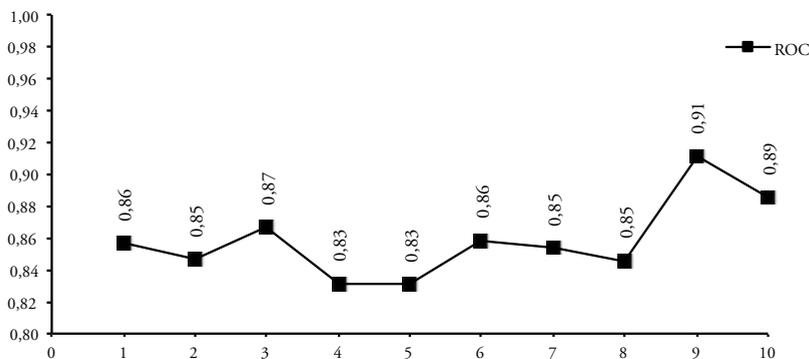


FUENTE ELABORACIÓN PROPIA. LOS NÚMEROS DENTRO DE LA IMAGEN REPRESENTAN LOS DIFERENTES MUNICIPIOS: 1. SAN LUIS POTOSÍ, 2. SOLEDAD DE GRACIANO SÁNCHEZ, 3. CERRO DE SAN PEDRO Y 4. MEXQUITIC DE CARMONA

**CUADRO 3 | Niveles de susceptibilidad de crecimiento urbano obtenidos con el modelo de regresión logística**

CATEGORÍA DE SUSCEPTIBILIDAD	RANGO	ÁREA (HA)	PORCENTAJE (%) RESPECTO AL ÁREA URBANA EN 2009 (15.992,71 HA)
Muy baja	0-0,2	70.316,6	439,7
Baja	0,2-0,4	2.519,4	15,8
Media	0,4-0,6	1.225,8	7,7
Alta	0,6-0,8	445,7	2,8
Muy Alta	0,8-1	261	1,6
Total		74.768,5	

**FIGURA 9 | Valores de la curva ROC obtenidos mediante la técnica de validación cruzada 10-fold**



FUENTE ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS OBTENIDOS DEL PROCESAMIENTO DEL MODELO DE REGRESIÓN LOGÍSTICA

### Discusión

La explosión demográfica y la migración de personas hacia las ciudades en búsqueda de mejores condiciones de vida han generado una serie de problemas económicos, sociales y ambientales durante las últimas décadas. En este sentido, muchos investigadores han tratado de identificar alternativas apropiadas para planear un desarrollo urbano que sea sustentable, a través del análisis y predicción del crecimiento urbano. En este trabajo se empleó información proveniente de imágenes de satélite para mapear el crecimiento urbano en la ZMSLP. También se empleó información de diversas fuentes para explicar, a través de un modelo estadístico binario, la susceptibilidad de crecimiento urbano.

La tasa de crecimiento urbano obtenida en este trabajo para la ZMSLP (3,91%) es muy parecida a la tasa de crecimiento de la población obtenida por Aguilar y

Vázquez (2000) para el periodo 1990-1995 (3,49% anual). La tasa de crecimiento poblacional de la ZMSLP es comparable con las de otras ciudades mexicanas con características similares, como Chihuahua (3,38%), Toluca (3,70%), Piedras Negras (3,85%), Nogales (4,75%), que también comparten un pujante sector industrial. Delgado-Macías (2008) revela que la ZMSLP se encuentra entre las ocho ciudades mexicanas más favorecidas por la puesta en marcha del Tratado de Libre Comercio de América del Norte (1994), condición demostrada por el crecimiento en las remesas, la inversión extranjera directa y el capital humano. Esta situación ha sido el principal detonante para el desarrollo de vivienda e infraestructura. El porcentaje de población urbana respecto a la rural en San Luis Potosí subió de 31,8% en 1970 a 56,9% en 2010, aunque se ha mantenido por debajo del referente nacional, que pasó de ser del 47% en 1970, a un 77,3% en 2010. Esto revela que la población urbana de San Luis Potosí ha presentado un crecimiento constante y de cierta manera comparable al registrado a nivel nacional (Garza & Scheingart, 2010). El crecimiento urbano registrado en la ZMSLP es de tipo centrífugo, modalidad que consiste en una intensificación poblacional hacia la periferia. Un fenómeno frecuente en las grandes ciudades es el cambio de un patrón de alta densidad poblacional a uno de urbanización dispersa en áreas más alejadas del centro poblacional. Esta dinámica de suburbanización se produce en una gran cantidad de ciudades de carácter metropolitano (Contreras-Gatica, 2011; Isunza-Vizuet & Méndez-Baena, 2011). La ZMSLP presenta una dinámica de expansión urbana que se extiende a partir de los márgenes del territorio urbanizado. Álvarez de la Torre (2011) caracteriza a San Luis Potosí con una estructura semiconcéntrica, lo cual significa que el desarrollo de la ciudad ha seguido una forma regular, sin ser necesariamente en forma circular.

De manera general, los modelos tradicionales de ciudad tienen dos tipos de estructura urbana, la compacta mediterránea y la difusa anglosajona. No obstante, Abramo (2012) defiende que el caso latinoamericano se ilustra con un nuevo tipo de configuración urbana, que denomina estructura *com-fusa*. Este tipo se caracteriza por ser una estructura híbrida (*compacta* y *difusa*), que ha sido determinada principalmente por el mercado formal e informal de manera simultánea, generando un ciclo perverso donde la compactación promueve la difusión y viceversa. Es decir, que el efecto ineludible del mercado fomenta la estructura espacial de una ciudad *com-fusa*. Para el caso de la estructura urbana de la ZMSLP, se puede catalogar como una ciudad *com-fusa*. La zona *compacta* se puede apreciar al suroeste, donde se presenta un área que ha optado por el desarrollo de infraestructura urbana vertical; mientras que la zona *difusa* se distribuye hacia el noreste y sureste de la ZMSLP. Las familias que no puedan comprar terrenos en las zonas centrales, buscarán alternativas en las zonas más alejadas del centro, fomentando la difusión de la mancha urbana. Pero al ver que los costos de traslado (económicos, tiempo y riesgo) aumentan, dichas familias tenderán a regresar a buscar lugares para vivir cerca del centro, fomentando los desarrollos de infraestructura vertical. Aunado a esto, otro factor de precarización del ambiente compacto es la disminución de los indicadores de habitabilidad, como la facilidad de traslado para entrar y salir de la zona compacta, la disponibilidad de agua, etcétera. Esto explica el papel de la estructura urbana del territorio en el fomento de su propio crecimiento.

Por otro lado, se ha documentado que la estructura urbana tiene un efecto significativo en diversas variables, que incluyen la segregación socioresidencial o diferenciación demográfica (Martínez-Fernández & Luengo-Gallego, 2005; Marmolejo-Duarte & Batista-Doria de Souza, 2011). Para el caso de la ZMSLP, Moreno-Mata (2012) caracterizó el fenómeno de segregación residencial con base en algunas variables socioeconómicas, como cambios en los estilos de vida, nuevos arreglos residenciales, desarrollo de la ciudad desigual, cerrada o insegura, y estigmatización de áreas o grupos de población. Esto evidencia que la estructura urbana tiene un efecto en la regionalización de los estratos sociales, dado que se identifican las zonas de acuerdo con el nivel socioeconómico de sus habitantes.

Comparado con otros trabajos como los realizados por Cheng y Masser (2003), Etter et al. (2006), Luo y Wei (2009) y Park, Jeon, Kim & Choi (2011), las variables utilizadas en esta investigación para caracterizar el crecimiento urbano son más diversas, ya que incluyen de tipo geográfico, social, económico y espacial, lográndose así una visión más completa del problema en estudio. Los factores determinantes del crecimiento urbano, estadísticamente significativos, son consistentes con las evidencias teóricas. La distancia a la zona industrial fue una variable estadísticamente significativa para modelar el crecimiento urbano. Aguilar y Vázquez (2000) caracterizaron 101 ciudades mexicanas procesando información socioeconómica y productiva mediante la técnica multivariada de análisis de componentes principales. Mencionan que la ZMSLP ha podido competir para atraer inversión en empresas vinculadas a la industria, generando un crecimiento bien diferenciado basado en el impulso a las actividades industriales y, con ello, el crecimiento de la mancha urbana. Por otro lado, Cabrero-Mendoza, Orihuela-Jurado & Zicardi-Contagiani (2009) determinan, con base en la competitividad urbana obtenida a partir de variables económicas, sociodemográficas, urbano-ambientales e institucionales, que la ZMSLP se encuentra en la cuarta posición a nivel nacional. Esto explica la preferencia de inversiones encaminadas al desarrollo industrial, y con ello una real influencia en el crecimiento de la mancha urbana en la ZMSLP.

Por otra parte, las consecuencias ambientales del crecimiento urbano (e.g. industrial) tienen múltiples dimensiones. Maza-Moreno y Santacruz de León (2010) documentaron detalladamente el impacto ambiental ocasionado en la ZMSLP durante el periodo 1970-1995 por el crecimiento industrial, efecto detectado mediante la fotointerpretación de imágenes aéreas. Las principales implicaciones ambientales que encontraron fueron las modificaciones al uso del suelo y el uso de agua, tanto en el volumen de consumo como en el agua residual. Para el caso del uso del suelo, la agricultura de temporal, el matorral crassicaule dominado por especies del género *Opuntia*, así como pastizal natural en combinación con matorral subierme, fueron las clases de vegetación y uso del suelo más afectados por el crecimiento industrial en la ZMSLP. Entre las consecuencias ambientales inmediatas de dichos cambios en la configuración en el uso del suelo se encuentra la disminución del coeficiente de infiltración de la precipitación al subsuelo, así como la combinación de dicha escorrentía con el agua residual industrial (Maza-Moreno & Santacruz de León, 2010). Dicho de otra manera, el agua de lluvia que debería ser infiltrada al subsuelo por los diferentes tipos de cobertura vegetal, ahora se combina con el agua residual,

generando diferentes estragos en el sistema de drenaje de la ciudad, así como en la salud de la población. Respecto al volumen de consumo de agua, el impacto que ha ocasionado el crecimiento urbano se ha reflejado en la disminución del nivel freático a velocidades preocupantes. Esto, aunado a las condiciones de clima árido prevalecientes en la ZMSLP, que incluyen escasa precipitación y alta evaporación, dificulta la posibilidad de recarga del acuífero (Maza-Moreno & Santacruz de León, 2010; Noyola-Medrano et al., 2009).

La elevación fue otra variable estadísticamente significativa para predecir el comportamiento del crecimiento urbano durante el periodo de análisis. Diversos autores han empleado esta variable para explicar la susceptibilidad de crecimiento urbano, encontrando una relación inversa (Batisani & Yarnal, 2009). Esto significa que a mayor elevación se estima una menor susceptibilidad de ser urbanizado. Dado que el área de estudio es un valle rodeado por montañas, resulta lógico pensar que las zonas más aptas para extender la mancha urbana sean aquellas que se encuentren en el valle, es decir, con una menor elevación.

Otra variable que resultó estadísticamente significativa para modelar el crecimiento urbano fue el costo de uso de suelo, cuya relación fue positiva. Esto significa que a mayor costo de uso de suelo existe una mayor tendencia a la urbanización. Normalmente las áreas que cuentan con un mayor costo de uso de suelo tienen mejores condiciones, como la disponibilidad de recursos naturales. Por ejemplo, existen dos variables (aunque estadísticamente no fueron significativas:  $\alpha=0,01$  en el primer modelo de regresión logística) que pueden sustentar la idea de la preferencia de mejor disponibilidad de recursos naturales para el crecimiento urbano. Una de ellas es la disponibilidad de agua, con una relación positiva, y el contenido de flúor en el agua, con una relación inversa. Esto significa que las áreas más susceptibles de crecimiento son aquellas que tengan una mayor disponibilidad del agua y menor contenido de flúor. La disponibilidad de agua en el manto freático es importante para sostener los diferentes usos consuntivos del vital líquido. Por su parte, un menor contenido de flúor en el agua potable, obtenida de pozos profundos, asegura un menor riesgo a la salud humana. La interpretación de estas dos variables dentro del costo uso del suelo se hace a partir de un tipo de enmascaramiento; es decir, que aunque estas variables no resultaron estadísticamente significativas, la variabilidad espacial fue recogida por el costo del uso del suelo.

La coordenada  $x$  UTM fue la última variable estadísticamente significativa incluida en el modelo. Esta variable, cuyo signo negativo reveló una tendencia con dirección este-oeste, ayudó a comprender que el área con mayor preferencia para el desarrollo urbano es aquella que se encuentra en una zona exclusiva de la ZMSLP, localmente conocida como Lomas. Esta zona se caracteriza por tener infraestructura de mejor calidad que el resto de la población y, en general, un perfil socioeconómico caracterizado por mejores condiciones de vida. Esto revela las preferencias de los urbanizadores por llevar al extremo las condiciones de la zona de Lomas, las cuales tratan de responder a un mercado exigente que prefiere exclusividad y lujo en las construcciones. La existencia de zonas exclusivas en las ciudades es un fenómeno que responde a tendencias de segregación residencial (Aguilar & Mateos, 2011).

La estimación de la susceptibilidad de crecimiento urbano en la ZMSLP con el modelo de regresión logística obtenido revela en primer lugar, con base en las

tendencias observadas y las variables estadísticamente significativas, la dirección más probable que tomará el crecimiento urbano. Los valores de la curva ROC obtenidos durante el proceso de validación fueron satisfactorios, ya que se concentraron en un intervalo entre 0,83 y 0,91. Este indicador habla de la representatividad de las muestras empleadas para describir la variabilidad del fenómeno de crecimiento urbano. Los estudios enfocados en el crecimiento urbano que emplean el modelo de regresión logística exhiben diferentes valores de ROC. Batisani y Yarnal (2009) obtuvieron valores de 0,88 y 0,90 en la predicción del crecimiento urbano para la región de Condado de Centre, Pennsylvania; Yu y Du (2011) obtuvieron un valor general de la curva ROC de 0,89 para un estudio realizado en el condado de Jiayu, de la provincia de Hubei, China; Park et al. (2011) obtuvieron un valor de 0,94 en un estudio de crecimiento urbano para Corea del Sur.

Los resultados obtenidos en estudios de estimación de susceptibilidad de crecimiento urbano pueden ser empleados para realizar algunos ajustes a la política de crecimiento urbano en las ciudades. Al tener una evidencia de la probable dirección del crecimiento urbano, se podrían plantear alternativas para modificar las tendencias, si es que no son las adecuadas. Otros estudios complementarios pueden ser enfocados para la determinación de las zonas óptimas de crecimiento urbano, considerando la opinión de expertos sobre la importancia que debe tener cada factor, así como la construcción de escenarios que concilien diferentes objetivos. La información proveniente de este tipo de trabajos puede ser empleada para el diseño de políticas encaminadas a un desarrollo urbano ordenado que utilice de manera eficiente los recursos y las condiciones naturales que se presenten en un área determinada.

### Conclusiones

Este trabajo empleó el modelo de regresión logística para conocer las causas espaciales que determinaron el crecimiento urbano registrado durante el periodo 1990-2009 en la zona metropolitana de San Luis Potosí, México. El crecimiento urbano se obtuvo con información geoespacial proveniente de imágenes del satélite Landsat 5 TM (30 m de tamaño de píxel), mientras que las variables explicatorias se generaron a través del procesamiento de información geográfica mediante operadores de distancia. El análisis reveló que la porción territorial de la zona conurbada de San Luis Potosí más probable para el crecimiento de la ciudad se encuentra a una menor distancia al centroide de la zona industrial, en las zonas de llanura con una menor elevación sobre el nivel del mar, en lugares con mayor costo del uso del suelo y que se localicen hacia el oeste del área de estudio. Los mapas obtenidos de la variable susceptibilidad de urbanización representan una interesante herramienta de planeación territorial, ya que delimitan las zonas que tendrían una alta probabilidad de ser urbanizada en el futuro cercano, revelando la tendencia de los patrones espaciales de la urbanización del área conurbada de San Luis Potosí. Los resultados de esta investigación fueron validados satisfactoriamente a través de la aplicación de un algoritmo de validación cruzada y el indicador de bondad de ajuste del área bajo la curva ROC (0,83 a 0,91). La investigación futura relacionada con el crecimiento urbano de la ZMSLP se puede enfocar en la determinación de las zonas óptimas

para el crecimiento urbano, basándose para ello en modelos espaciales multicriterio y multiobjetivo que consideren diferentes puntos de vista de los tomadores de decisiones, así como diferentes escenarios de planeación. Esta puede ser una herramienta fundamental para el desarrollo de un ordenamiento territorial centrado en las preferencias de los usuarios, así como en el mejor aprovechamiento de las condiciones naturales, sociales, económicas que ofrece el entorno. Esta metodología cuantitativa aplicada a obtener conocimiento sobre el grado de susceptibilidad de crecimiento urbano para aquellos terrenos que no se encuentran construidos, representa un valioso recurso para la planeación territorial a nivel municipal.

### Referencias bibliográficas

- Abramo, P. (2012). La ciudad com-fusa: mercado y producción de la estructura urbana en las grandes metrópolis latinoamericanas. *EURE*, 38(114), 35-69. <http://dx.doi.org/10.4067/S0250-71612012000200002>
- Aguilar, A. & Mateos, P. (2011). Diferenciación sociodemográfica del espacio urbano de la Ciudad de México. *EURE*, 37(110), 5-30. <http://dx.doi.org/10.4067/S0250-71612011000100001>
- Aguilar, A. & Vázquez, M. (2000). Crecimiento urbano y especialización económica en México. Una caracterización regional de las funciones dominantes. *Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía de la UNAM*, (42), 87-108. Disponible en <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=56904207>
- Aguilera-Benavente, F. (2006). Predicción del crecimiento urbano mediante sistemas de información geográfica y modelos basados en autómatas celulares. *GeoFocus*, (6), 81-112. En [http://geofocus.rediris.es/2006/Articulo4\\_2006.pdf](http://geofocus.rediris.es/2006/Articulo4_2006.pdf)
- Álvarez de la Torre, G. (2011). Estructura y temporalidad urbana de las ciudades intermedias en México. *Frontera Norte*, 23(46), 91-124. Disponible en <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=13619212004>
- Baldwin, R., Trombulak, S., Anderson, M. & Woolmer, G. (2007). Projecting transition probabilities for regular public roads at the ecoregion scale: A Northern Appalachian /Acadian case study. *Landscape and Urban Planning*, 80(4), 404-411. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2006.09.003>
- Barredo, J. & Demicheli, L. (2003). Urban sustainability in developing countries megacities: modeling and predicting future urban growth in Lagos. *Cities*, 20(5), 297-310.
- Batisani, N. & Yarnal, B. (2009). Urban expansion in Centre County, Pennsylvania: Spatial dynamics and landscape transformations. *Applied Geography*, 29(2), 235-249. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeog.2008.08.007>
- Braimoh, A. & Onishi, T. (2007). Spatial determinants of urban land use change in Lagos, Nigeria. *Land Use Policy*, 24(2), 502-515. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landusepol.2006.09.001>
- Cabrero-Mendoza, E., Orihuela-Jurado, I. & Zicardi-Contagiani, A. (2009). Competitividad urbana en México: una propuesta de medición. *EURE*, 35(106), 79-99. <http://dx.doi.org/10.4067/S0250-71612009000300005>

- Carr, D., Murtinho, F., Pan, W., Barbieri, A., Bilborrow, R., Suchindran, Ch. & Whitmore, T. (2008). Un análisis multinivel de población y deforestación en el Parque Nacional Sierra de Lacandón (Petén, Guatemala). *Documents D'Analisi Geografica*, (52), 49-67. Disponible en <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2876721>
- Cheng, J. & Masser, I. (2003). Urban growth pattern modeling: a case study of Wuhan city, PR China. *Landscape and Urban Planning*, 62(4), 199-217. Disponible en [http://dx.doi.org/10.1016/S0169-2046\(02\)00150-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0169-2046(02)00150-0)
- Cifuentes-Ruiz, P. (2009). Modelización de los factores de crecimiento urbano como aporte a la sostenibilidad. Estudio de caso: Manizales-Colombia. *Revista Internacional de Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo*, (4), 81-190. En <http://upcommons.upc.edu/revistes/bitstream/2099/8536/1/cifuentes.pdf>
- Contreras-Gatica, Y. (2011). La recuperación urbana y residencial del centro de Santiago: Nuevos habitantes, cambios socioespaciales significativos. *EURE*, 37(112), 89-113. Disponible en <http://www.scielo.cl/pdf/eure/v37n112/art05.pdf>
- Delgadillo-Macías, J. (2008). Desigualdades territoriales en México derivadas del tratado de libre comercio de América del Norte. *EURE*, 34(101), 71-98. <http://dx.doi.org/10.4067/S0250-71612008000100004>
- Dong, J., Zhuang, D., Xu, X. & Ying, L. (2008). Integrated evaluation of urban development suitability based on remote sensing and GIS techniques-A case study in Jingjinji Area, China. *Sensors*, 8(9), 5975-5986. <http://dx.doi.org/10.3390/s8095975>
- Etter, A., McAlpine, C., Wilson, K., Phinn, S. & Possingham, H. (2006). Regional patterns of agricultural land use and deforestation in Colombia. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 114(2-4), 369-386. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2005.11.013>
- Fang, S., Gertner, G., Sun, Z. & Anderson, A. (2005). The impact of interactions in spatial simulation of the dynamics of urban sprawl. *Landscape and Urban Planning*, 73(4), 294-306. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2004.08.006>
- Fang, S., Gertner, G., Sun, Z. & Anderson, A. (2007). Prediction of multinomial probability of land use change using a bisection decomposition and logistic regression. *Landscape Ecology*, 22(3), 419-430. doi: 10.1007/s10980-006-9037-7
- Gabriel, S., Faria, J. & Moglen, G. (2006). A multiobjective optimization approach to smart growth in land development. *Socio-Economic Planning Sciences*, 40(3), 212-248. <http://dx.doi.org/10.1016/j.seps.2005.02.001>
- Galván-Arellano, A. (2006). *El desarrollo urbano en la ciudad de San Luis Potosí, estudio de arquitectura del siglo XVII*. San Luis Potosí: Instituto Nacional de Antropología e Historia y Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- García, A., Chagolla, G. & Noriega, M. (2006). Efectos de la colinealidad en el modelado de regresión y su solución. *Cultura Científica y Tecnológica (CULCyT)*, (3)16-17, 23-34.
- García, L., Santé, R. & Crecente, M. (2010). Análisis de los factores que condicionan la evolución de los usos del suelo en los pequeños asentamientos urbanos de la costa norte de Galicia. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, (54), 57-79. En <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3605447>
- Garza, G. & Scheingart, M. (2010). *Los grandes problemas de México. II. Desarrollo urbano y regional*. México, D.F.: El Colegio de México.

- Gómez-Ángel, A. (2009). *Estudio multitemporal de la dinámica de transformación espacial de la cobertura por crecimiento urbano, en una zona de la localidad de Suba, Bogotá-Colombia, en el periodo 1955-2006*. Tesis. Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Estudios Ambientales y Rurales.
- Hirales-Cota, M., Espinoza-Avalos, J., Schmook, B., Ruiz-Luna, A. & Ramos-Reyes, R. (2010). Drivers of mangrove deforestation in Mahahual-Xcalak, Quintana Roo, southeast Mexico. *Ciencias Marinas*, 36(2), 147-159. Disponible en <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48013189004>
- Huang, Q., Cai, Y. & Peng, J. (2007). Modeling the spatial pattern of farmland using GIS and multiple logistic regression: a case study of Maotiao River Basin, Guizhou Province, China. *Environmental Modeling and Assessment*, 12(1), 55-61. Disponible en <http://www.environmental-expert.com/Files%5C6063%5Carticles%5C15220%5CArt6.pdf>
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (2002). *Síntesis de Información Geográfica del Estado de San Luis Potosí*. Aguascalientes: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (2011a). *Censos y conteos de población y vivienda*. México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Disponible en <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/ccpv/>
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (2011b). *Marco Geoestadístico Municipal 1995*. México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Disponible en [http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geoestadistica/m\\_geoestadistico.aspx](http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geoestadistica/m_geoestadistico.aspx)
- Isunza-Vizuet, G. & Méndez-Bahena, B. (2011). Desarrollo inmobiliario y gobiernos locales en la periferia de la Ciudad de México. *EURE*, 37(111), 107-129. <http://dx.doi.org/10.4067/S0250-71612011000200005>
- Kirk, R., Bolstad, P.V. & Manson, S.M. (2012). Spatio-temporal trend analysis of long-term development patterns (1900-2030) in a Southern Appalachian County. *Landscape and Urban Planning*, 104(1), 47-58. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.09.008>
- Landín, R. (2006). *Parámetros fisicoquímicos y concentración de flúor y arsénico en el agua de los pozos de la ciudad de San Luis Potosí y zona conurbada. Alternativa de tratamiento: adsorción del flúor y arsénico en la interface Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> actividad/solución acuosa*. Tesis de Maestría en Ciencias Ambientales. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Liu, Y. (2009). *Modelling urban development with geographical information systems and cellular automata*. Nueva York: CRC Press, Taylor and Francis Group.
- Luo, J. & Wei, Y. (2009). Modeling spatial variations of urban growth patterns in Chinese cities: The case of Nanjing. *Landscape and Urban Planning*, 91(2), 51-64. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2008.11.010>
- Marmolejo-Duarte, C. & Batista-Dória de Souza, N.J. (2011). Estructura urbana y segregación socioresidencial: un análisis para Maceló-Alagoas, Brasil. *Papeles de población*, 17(70), 247-286. Disponible en <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=11221584010>
- Martínez-Fernández, L.C. & Luengo-Gallego, J.A. (2005). Población y estructura urbana: aproximación a la diferenciación demográfica de la ciudad de Segovia. *Investigaciones Geográficas*, (37), 47-58.

- Maza-Moreno, C. & Santacruz de León, G. (2010). Diagnóstico preliminar del uso industrial del agua y su impacto ambiental en la ciudad de San Luis Potosí. *Primer Congreso Red de Investigadores Sociales sobre Agua. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Morelos, México*, 18 y 19 de marzo de 2010.
- Moreno-Mata, A. (2012). Segregación residencial en la Zona Metropolitana de San Luis Potosí: causas y manifestaciones. *XI Reunión Nacional de Investigación Demográfica en México. Sociedad Mexicana de Demografía. Aguascalientes, Ags, México*, 31 de mayo de 2012.
- Noyola-Medrano, M.C., Ramos-Leal, J.A., Domínguez-Mariani, E., Pineda-Martínez, L. F., López-Loera, H.L. & Carbajal, N. (2009). Factores que dan origen al minado de acuíferos en ambientes áridos: caso Valle de San Luis Potosí. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 26(2), 395-410. Disponible en [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1026-87742009000200010&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1026-87742009000200010&script=sci_arttext)
- Park, S., Jeon, S. & Choi, Ch. (2012). Mapping urban growth probability in South Korea: comparison of frequency ratio, analytic hierarchy process, and logistic regression models and use of the environmental conservation values assessment. *Landscape and Ecological Engineering*, 8(1), 17-31. doi: 10.1007/s11355-010-0137-9
- Park, S., Jeon, S., Kim, S. & Choi, Ch. (2011). Prediction and comparison of urban growth by land suitability index mapping using GIS and RS in South Korea. *Landscape and Urban Planning*, 99(2), 104-114. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.09.001>
- Pineda, J., Bosque, S., Gómez, D. & Plata, R. (2009). Análisis de cambio del uso del suelo en el Estado de México mediante sistemas de información geográfica y técnicas de regresión multivariantes. Una aproximación a los procesos de deforestación. *Investigaciones Geográficas Boletín del Instituto de Geografía UNAM*, (69), 33-52. Disponible en <http://www.revistas.unam.mx/index.php/rig/article/view/18003>
- Rivera-Cervantes, C. (2009). *Impacto de la diabetes mellitus en el bienestar socioeconómico de los adultos mayores*. Tesis de Posgrado en Estadística, Universidad de Costa Rica.
- Sánchez-Peña, L. (2006). Métodos para el análisis espacial. Una aplicación al estudio de la geografía de la pobreza. *II Congreso de la Asociación Latinoamericana de Población (ALAP)*, Guadalajara, México, 3-5 de septiembre de 2006.
- Schneider, A., Friedl, M. & Potere, D. (2010). Mapping global urban areas using MODIS 500-m data: new methods and datasets based on urban ecoregions. *Remote Sensing of Environment*, 114(8), 1733-1746. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2010.03.003>
- Serra, P., Saurí, D. & Pons, X. (2005). Metodología para el análisis de las transformaciones paisajísticas de áreas rurales mediterráneas. Evolución, causas y consecuencias en el caso del Alto Ampurdán (Noreste de Cataluña). *Anales de Geografía*, 25(36) 259-278. Disponible en <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=17603602>
- Sohl, T. & Saylor, K. (2008). Using the FORE-SCE model to project land-cover change in the southeastern United States. *Ecological Modelling*, 219(1-2), 49-65. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2008.08.003>
- Su, S., Xiao, R. & Zhang, Y. (2012). Multi-scale analysis of spatially varying relationships between agricultural landscape patterns and urbanization using geographically weighted regression. *Applied Geography*, 32(2), 360-375. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.06.005>
- Tewolde, M. & Cabral, P. (2011). Urban sprawl analysis and modeling in Asmara, Eritrea. *Remote Sensing*, 3(10), 2148-2165. doi: 10.3390/rs3102148

- United Nations (UN). (2012). *World Urbanization Prospects: The 2011 Revision*. [Presentation at the Center for Strategic and International Studies (CSIS) Washington, DC; 7 June 2012 Gerhard K. Heilig]. CD-ROM Edition. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. Disponible en [http://esa.un.org/wpp/ppt/CSIS/WUP\\_2011\\_CSIS\\_4.pdf](http://esa.un.org/wpp/ppt/CSIS/WUP_2011_CSIS_4.pdf)
- Yu, N. & Du, Q. (2011). Urban growth pattern modeling using logistic regression. *Geo-spatial Information Science*, 14(1), 62-67. doi: 10.1007/s11806-011-0427-x
- Zhang, Q. & Seto, K. (2011). Mapping urbanization dynamics at regional and global scales using multi-temporal DMSP/OLS nighttime light data. *Remote Sensing of Environment*, 115(9), 2320-2329. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2011.04.032>

