

Baluja Arestiño, J., Plata Rocha, W., Gómez Delgado, M. y Bosque Sendra, J. (2010): Análisis de factores explicativos del crecimiento urbano en el área metropolitana de Granada mediante técnicas estadísticas y SIG. En: Ojeda, J., Pita, M.F. y Vallejo, I. (Eds.), *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos*. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla. Sevilla. Pp. 640-657. ISBN: 978-84-472-1294-1

ANÁLISIS DE FACTORES EXPLICATIVOS DEL CRECIMIENTO URBANO EN EL ÁREA METROPOLITANA DE GRANADA MEDIANTE TÉCNICAS ESTADÍSTICAS Y SIG

Javier Baluja Arestiño¹, Wenceslao Plata Rocha², Montserrat Gómez Delgado³, Joaquín Bosque Sendra³

(1) Instituto de Ciencias de la Vid y el Vino (ICVV). Calle Madre de Dios, 52. 26006. Logroño, La Rioja, España. javier.baluja@unirioja.es

(2) Escuela de Ciencias de la Tierra. Universidad Autónoma de Sinaloa. Av. De las Américas y Blvd. Universitarios. Cd. Universitaria. 80010. Culiacán, Sinaloa, México. wenses_plata@hotmail.com

(3) Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá. Calle Colegios, 2. 28801. Alcalá de Henares, Madrid, España. montserrat.gomez@uah.es

RESUMEN

Este trabajo tiene como finalidad realizar un análisis sobre los factores espaciales que incidieron en el crecimiento urbano del Área Metropolitana de Granada (AMG) durante el período 1990 - 2000. Para ello, a partir de la cartografía del *Corine Land Cover*, se obtuvieron las categorías con un incremento significativo en dicho periodo (Tejido Urbano Continuo, Urbanizaciones Exentas y A Jardinadas y Zonas Comerciales e Industriales). Dichas categorías se relacionaron con hasta 30 variables socioeconómicas, biofísicas, de planeación y de proximidad/accesibilidad, a nivel municipal y píxel, aplicando las siguientes técnicas estadísticas: Regresión Lineal Múltiple, Regresión por Mínimos Cuadrados Parciales, Regresión Logística Espacial y Regresión Geográficamente Ponderada. Para el ajuste de los modelos se utilizaron los software estadísticos SPSS y Statistica, un Sistema de Ayuda a la Decisión Espacial (GWR 3.0) y el Sistema de Información Geográfica Idrisi Andes.

Los principales resultados muestran que las variables densidad de población, empleo, densidad de carreteras, distancia al centro de negocios, altitud y pendiente, entre otras, mantienen una relación significativa con el crecimiento urbano del AMG. Asimismo, se verificó que en este estudio resultan significativas variables similares a las obtenidas en el estudio realizado para la Comunidad de Madrid durante el mismo período.

Palabras Clave: Crecimiento urbano, factores explicativos, SIG, Área metropolitana de Granada, técnicas de regresión.

ABSTRACT

The objective of this work was to analyze the spatial factors that influenced changes in land use in the Metropolitan Area of Granada (MAG) from 1990 to 2000. In this context, *Corine Land Cover* cartography was used to obtain the categories which indicated the most significant changes in land use such as Continuous Urban Fabric,

Residential Discontinuous Sparse Urban, and Industrial or Commercial Units during this period. These categories were associated with up to thirty variables including socioeconomic levels, biophysics, urban planning and proximity/accessibility factors. These variables were used at municipal or pixel level. The statistical techniques used in the analysis of these groups of data were: Multiple Linear Regression, Partial Least squares, Spatial Logistic Regression, and Geographic Weighted Regression. SPSS and Statistica were used in the statistical analysis while GWR 3.0 and Idrisi Andes were used to analyse the geographic information.

Results show that population density, employment, highways density, altitude or slope were variables which had a significant relation with urban growth. Moreover, it was verified that some significant variables are similar to those in previous studies made for the Region of Madrid.

Key words: Urban growth, GIS, explain factors, Metropolitan Area of Granada, regression techniques.

INTRODUCCIÓN

Históricamente, el estudio del crecimiento urbano, ha sido determinado atendiendo al aumento de población. Los cambios socio-económicos acaecidos en los últimos años derivan en nuevas dinámicas de crecimiento, en lugares con poca o nula presión demográfica, originadas por gran variedad de factores influyentes (EEA, 2006).

Para estudiar este tema se han desarrollado y aplicado diversas metodologías, basadas principalmente en procedimientos estadísticos (Bocco *et al.*, 2000; Hoshino, 2001; Cheng y Masser, 2003; Verburg *et al.*, 2004; Conway, 2005; Pan y Bilsborrow, 2005; Serra *et al.*, 2005; Hu y Lo, 2007; Zhang *et al.*, 2007). Asimismo, Lesschen *et al.*, (2005) en el informe número 7 del programa *Land Use and land Cover Change (LUCC)*, proporciona una amplia descripción de técnicas estadísticas y empíricas utilizadas en el análisis espacial de cambios de usos y coberturas del suelo.

Es importante señalar que la dinámica del crecimiento de suelo urbano responde a un conjunto de factores o variables que, por su tipo o características, influyen de manera diferente. Un primer grupo serían todas aquellas variables derivadas de las características del terreno, que en gran medida condicionan los costes y las características constructivas; encontrándose factores tan determinantes como la orientación, la altitud o la pendiente. Como es lógico, debido a su propia naturaleza, este tipo de variables se miden de modo continuo, a nivel de píxel, para todo el territorio. Otro tipo de influencias serían las derivadas de las características socioeconómicas, legales y administrativas. Dentro de este tipo de variables se pueden incluir al crecimiento de la población, incremento de la renta, superficie urbanizable, etc. En España este tipo de variables se miden a nivel municipal. El tercer grupo estaría constituido por variables de proximidad; como serían la cercanía a ríos, carreteras, zonas urbanas preexistentes, etc. En esta línea, por citar un ejemplo, lo más normal es que las nuevas zonas requieran de infraestructuras ya existentes o cierta proximidad a ríos, aunque salvaguardando en este último caso, las distancias mínimas que marca la legislación. Este último tipo de variables se miden a nivel píxel, utilizando las herramientas que para ello proporcionan los Sistemas de Información Geográfica (SIG).

En el caso del Área Metropolitana de Granada, deben existir un conjunto de factores y variables similares a las citadas que guíen los cambios de usos del suelo y concretamente los relacionados con el crecimiento urbano. El objetivo de este trabajo será determinar de forma cuantitativa estos factores mediante el empleo de técnicas estadísticas (regresión por mínimos cuadrados parciales, regresión geográficamente ponderada, regresión logística espacial) y de Sistemas de Información Geográfica. Asimismo realizar una comparación con los resultados obtenidos con un estudio previo en la Comunidad de Madrid (Plata *et al.*, 2008b y c). Cabe mencionar, que a la hora de realizar la comparación no se ha podido contar con exactamente las mismas categorías, dado que para la Comunidad de Madrid existía la categoría de estructura urbana laxa que no aparece para la de Granada; en lugar de ésta es importante el tejido urbano continuo.

ÁREA DE ESTUDIO Y DATOS

El área de estudio del presente trabajo está localizada al Sudeste de España, dentro de la Comunidad de Andalucía, al suroeste de la Provincia de Granada. La citada Provincia tiene una extensión total de 12.635 Km², ocupados por 168 municipios; de los cuales 32, constituirían los municipios originales del Área Metropolitana de Granada.

Entre los años 1990 y 2000, en el Área Metropolitana de Granada, las zonas urbanas han aumentado en 2063,5 Ha (figura 1); de las cuales el 40% se correspondería con tejido urbano continuo. Una de las principales

características del patrón de crecimiento de las diferentes categorías de uso urbano estudiadas, es que las ganancias de cada uso urbano se muestran ampliamente distribuidas por todo el ámbito de estudio (figura 1).

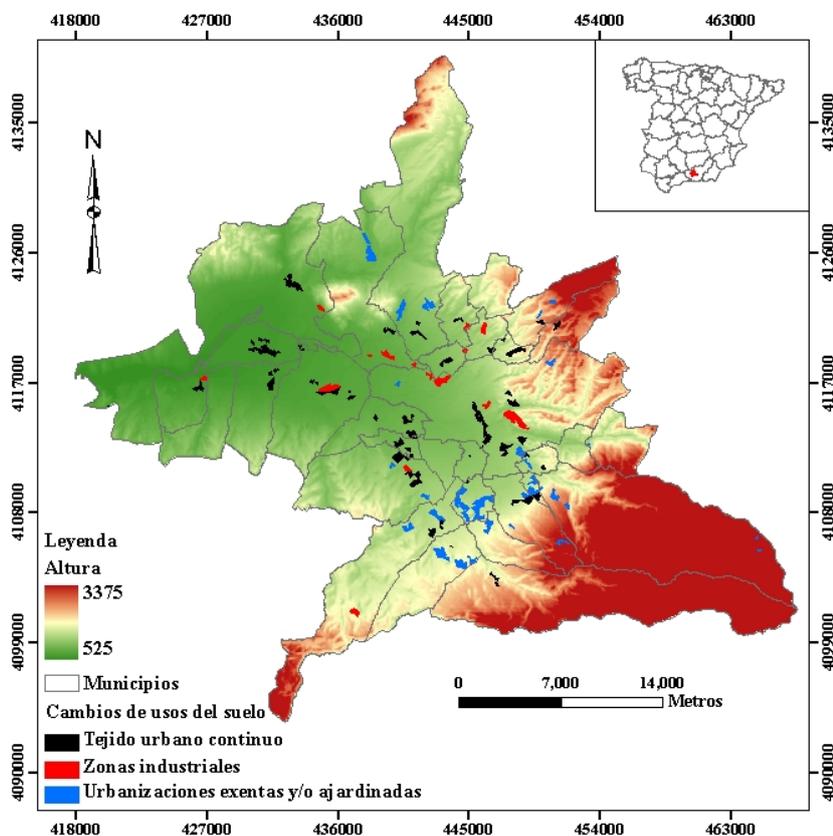


Figura. 1. Localización del área de estudio y crecimiento urbano experimentado entre 1990 y 2000. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos del *Corine Land Cover*.

El estudio se llevó a cabo para las categorías tejido urbano continuo, urbanizaciones exentas y/o ajardinadas y zonas industriales y comerciales, en el Área Metropolitana de Granada, en el período 1990-2000. De todas las categorías artificiales del *Corine Land Cover* (CLC), éstas han sido identificadas como las que mayor crecimiento han presentado en nuestro ámbito de estudio.

La elección de las variables o factores explicativos del fenómeno de expansión urbana se realizó tomando en consideración la literatura existente y la disponibilidad de información de la región para llevarlo a cabo. De este modo, como variables explicativas, y tomando como referencia el año 1990, se recopiló información de hasta 30 variables diferentes de tipo socioeconómico, político, de planificación, proximidad/accesibilidad y de tipo biofísico (tabla 1).

TIPO	NOMBRE	DESCRIPCIÓN
Crecimiento de zonas Urbanas ¹	GTUC	Crecimiento de la categoría tejido urbano continuo (%)
	GUEA	Crecimiento de la categoría urbanizaciones exentas y/o ajardinadas (%)
	GZIC	Crecimiento de la categoría zonas industriales y comerciales (%)
	GT	Crecimiento de la combinación de las categorías anteriores (%)
Socio-económicas	DensPob	Densidad de población
	CrecPob	Incremento Población
	CrecEmp	Incremento Empleos
	PIncrViv	Incremento de número de viviendas (%)
	PIncrRenBruta	Incremento de renta bruta (%)
	DensCar	Densidad de carreteras (todas)
	Denscarnaco	Densidad de carreteras Nacionales y regionales
Planificación	Purbaniza	Porcentaje de superficie urbanizable
Políticas	Pvotoizq	Porcentaje de votos obtenidos por los partidos de izquierda en 1995 ²
	Ayunizq	Ayuntamientos potencialmente gobernados por partidos de izquierda ³
Proximidad/ Accesibilidad	DMCar	Distancia Media a Carreteras
	DMcarnaco	Distancia media a carreteras Nacionales y regionales
	DMHosp	Distancia Media a Hospitales de referencia
	DMCom	Distancia Media a grandes superficies comerciales
	DMUniv	Distancia Media a Universidades
	DMInstND	Distancia Media a Instalaciones no deseables
	DMBosq	Distancia Media a Bosque
	DMHid	Distancia Media a hidrografía
	DMANaturs	Distancia Media a áreas naturales protegidas

¹ Se utilizan los porcentajes y distancias medias (en cada municipio) para las técnicas PLS (regresión por mínimos cuadrados parciales) y RGP (regresión geográficamente ponderada); para la RLE (regresión logística espacial) se utilizan imágenes raster, tomándose el crecimiento como una variable dicotómica.

² Porcentaje de votos a Izquierda Unida y PSOE

³ Ayuntamientos en los que la suma de los votos a Izquierda Unida y PSOE supera el 45%.

	DMCentNeg	Distancia media al CBD de Granada
	PPCVBosq	% de píxeles en la cuenca visual de bosques
	PPCVerEmb	% de píxeles en la cuenca visual de embalses
	PPANatur	% de píxeles de espacios naturales protegidos
	PPCVANatur	% de píxeles en la cuenca visual de espacios naturales protegidos
	PPOSur	% de píxeles con orientación Sur-suroeste
	PPCPMe3	% de píxeles con pendiente < 3%
Biofísicas	PPCPe3y6	% de píxeles con pendiente entre 3 – 6%
	PPCAMe800	% de píxeles con altitud entre 0 – 800 metros.
	PPCAe801y1000	% de píxeles con altitud entre 801 - 1000 metros.
	PPCAMa1201	% de píxeles con altitud entre 1001- 1200 metros.

Tabla 1. Descripción de las variables dependientes e independientes utilizadas en el ajuste de los modelos. Todas las variables que miden crecimientos o cambios se refieren al periodo 1990-2000. Las variables que muestran un valor se refieren al año 1990.

MÉTODOS

El análisis espacial se realizó mediante los *software* SIG Idrisi Andes (Plata *et al.*, 2008a y c) y ArcGIS 9.2; el análisis estadístico mediante SPSS 17.0 (regresión lineal múltiple), Statistica 7 (regresión por mínimos cuadrados parciales), GWR3 (regresión geográficamente ponderada) e Idrisi Andes (regresión logística espacial).

Para llevar a cabo el análisis se utilizaron como variables dependientes las mismas categorías citadas en el apartado anterior y una cuarta resultado de la suma de todas ellas (tabla 1). Cabe señalar que en el análisis se presentan algunos problemas de ausencia de normalidad en la distribución de frecuencias de dichas variables, debido principalmente a que, en el área de estudio, existen algunos municipios sin crecimiento urbano y al bajo número de observaciones (32 municipios). Para salvar este problema se optó por llevar a cabo una normalización de dichas variables a través de una transformación logarítmica (Menard, 2002, P. 77; Montgomery *et al.*, 2005, P. 156).

Regresión por mínimos cuadrados parciales (PLS)

Es importante destacar, que las técnicas de regresión más usuales (regresión lineal múltiple) presentan una serie de inconvenientes a la hora de trabajar con variables de tipo espacial, tales como: exigencias en la valoración de la multicolinealidad y autocorrelación de las variables, gran número de observaciones, etc. Esto hace que dichas técnicas no sean, en ocasiones, las más adecuadas cuando se trabaja con datos territoriales. Como alternativa a los inconvenientes que presenta dicha técnica, se ha venido aplicando la Regresión por Mínimos Cuadrados Parciales (PLS, Partial Least Square) (Alciaturi *et al.*, 2005; Aguilera Aguilera y Garrido Frenich, 2001; Wold *et al.*, 2001; Zhang, Z. *et al.* 2007; Plata *et al.*, 2008b)

Para salvar los inconvenientes que plantea el uso de la regresión lineal múltiple, se han desarrollado metodologías basadas en la eliminación de variables independientes (métodos de selección de variables), o basadas en la reducción de la dimensionalidad de las variables a través de factores o componentes principales.

Mediante la técnica conocida como PLS, se busca un conjunto de variables latentes que ajusten una descomposición simultánea de las matrices X e Y bajo la condición de que expliquen tanto como sea posible la

covarianza entre X e Y ; y que la citada descomposición sea eficaz para ajustar Y (Alciaturi et al., 2005; Aguilera Aguilera y Garrido Frenich, 2001; Wold et al., 2001; Zhang, Z. et al. 2007;).

Básicamente, el modelo *PLS* se establece como una representación de la matriz X en términos de los factores T mediante la siguiente expresión:

$$X = T \cdot P^T + e$$

Siendo P^T la matriz transpuesta de P (pesos de los factores).

Y la relación entre las variables dependientes Y y los factores T se establece por:

$$Y = T \cdot b + f$$

La matriz de variables independientes X queda expresada por la matriz de factores T con un error (e) determinado en función del número de factores seleccionados. Si el modelo incluyera todos los factores resultantes de las combinaciones lineales el error sería cero ($e = 0$).

Asimismo los coeficientes de los factores b son obtenidos de modo que se minimice el error f .

Existen diferentes procedimientos, basados en procesos iterativos, para determinar la relación entre los factores T y la variable respuesta Y . Con ellos es posible obtener los coeficientes β_{PLS} a través del siguiente modelo de regresión lineal múltiple:

$$Y = X \cdot B_{PLS} + e .$$

Donde:

$$B_{PLS} = (P^T)^{-1} \cdot B \cdot C^T$$

Por consiguiente, si se toman en cuenta todos los factores al obtener los coeficientes β_{PLS} , éstos pueden ser comparados con los coeficientes derivados del modelo de regresión lineal múltiple β_{RLM} .

El ajuste de los modelos se determinará mediante R^2 , cómo la cantidad de varianza total explicada para cada una de las categorías estudiadas.

Regresión geográficamente ponderada (RGP)

Las variables dependientes en este caso fueron las mismas que para la *PLS*. Un paso previo a la realización de la *RGP* fue la selección de variables; para ello se utilizó la regresión lineal múltiple (*RLM*), con el método de selección de variables hacia atrás (*backward elimination*), dado que puede cubrir relaciones perdidas mediante la técnica de selección de variables hacia delante (*forward inclusion*) (Agresti and Finlay, 1997; Lesschen et al., 2005). La presencia de multicolinealidad se certificó mediante el índice de tolerancia y del factor de inflación de la varianza y la autocorrelación mediante el estadístico de Durbin-Watson (Plata et al., 2008b).

Esta técnica ha sido desarrollada para la exploración y descripción de datos espaciales, particularmente cuando prevalecen relaciones no estacionarias en el espacio (Brundson et al., 1998; Fotheringham et al., 2002). En el caso de la *RGP*, la relación entre variable dependiente y explicativas se plantea asociada a puntos localizados en el espacio geográfico. De esta forma se asume que, dependiendo de su ubicación, definida por un par de coordenadas tipo (u,v) , la relación puede experimentar variaciones. De este modo, el modelo puede expresarse de la siguiente forma (Fotheringham et al., 2002):

$$Y(u, v) = a(u, v) + b(u, v)X(u, v) + e(u, v)$$

Donde la componente (u,v) indica que los parámetros de la regresión tendrán influencias diferentes en cada localización específica, esto es posible gracias a la implementación de un esquema de estimación basado en la ponderación geográfica.

Los ponderadores son elegidos en función de una curva de peso de tipo gaussiano llamada *kernel*; de manera que, aquellas observaciones que son más cercanas en el espacio a la localización donde el parámetro local está siendo estimado, tengan una influencia mayor que aquellas observaciones que provienen de puntos más lejanos. En

este estudio se ha utilizado un kernel de ancho fijo, debido al bajo número de puntos muestrales, estimado por minimización del Coeficiente de Información de Akaike (AIC).

Para calibrar la función de la ponderación espacial de los modelos de este trabajo, se aplicó el AIC basándose en 32 puntos correspondientes a las coordenadas X e Y de los centroides de los municipios. Una forma de evaluar la presencia de esta variabilidad espacial es mediante el test de Hope, basado en el test de significancia de Monte Carlo. Esta evaluación realiza permutaciones de manera aleatoria, en las cuales se reestima el modelo de RGP validando la estabilidad de los coeficientes a los cambios de las coordenadas geográficas.

Regresión logística espacial (RLE)

El modelo de regresión logística espacial se realiza utilizando la siguiente ecuación:

$$\log \text{it} \left[\frac{Y=1}{Y=0} \right] = \frac{P}{1-P} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k$$

Donde: β son los parámetros estimados por el modelo; x_1, x_2, \dots, x_k son las variables explicativas incluidas en el modelo; y P es la probabilidad de que un píxel se transforme a urbano.

De este modo, se procedió a ajustar los cinco modelos de regresión logística espacial para las cinco variables dependientes dicotómicas; GTUC (crecimiento de: tejido urbano continuo), GUEA (urbanizaciones exentas y/o ajardinadas), GZIC (zonas industriales y/o comerciales), y GT (suma de todas las categorías anteriores, o urbanas). El ajuste de los modelos se certificó mediante el estadístico ROC (Relative Operating Characteristic) y a través del porcentaje de píxeles clasificados correctamente (PPCC1).

La capacidad computacional del SIG Idrisi Andes está limitada a la inclusión de no más de 20 variables, por tal motivo se realizó una selección de variables previa, tomando en cuenta el grado de multicolinealidad, correlación y el ajuste de cada variable independiente con cada variable dependiente.

RESULTADOS

Resultados obtenidos mediante la técnica PLS

Con la aplicación de la PLS se obtuvo una matriz de 29 factores, los cuales explicaron entre el 91,5 y 99,9% de la variabilidad de los modelos (tabla 2). Entre las variables de tipo socio-económico destaca la elevada influencia, en sentido negativo, de la variable porcentaje de incremento de viviendas y, de forma positiva, de la variable crecimiento de empleo, en todos los modelos, salvo para el crecimiento de urbanizaciones exentas y/o ajardinadas, donde la variable crecimiento de población tuvo una mayor influencia, en sentido positivo, que el crecimiento de empleo. Cabe mencionar, paralelamente, los altos coeficientes estandarizados encontrados para la variable densidad de carreteras nacionales y regionales, en el modelo que suma las tres categorías analizadas (GT).

Se observó que en todos los modelos analizados, las variables de proximidad-accesibilidad muestran una alta correlación. En este sentido, las variables proximidad a universidades y a zonas comerciales son las que tuvieron un mayor peso en todos los casos, ya sea en sentido positivo o negativo. Asimismo, se observó que la proximidad al centro e negocios tiene una elevada influencia en el modelo ajustado para las urbanizaciones exentas y/o ajardinadas (GUEA). En el tercer grupo de variables, biofísicas, se obtuvieron altos coeficientes para aquellas ligadas a la orografía del terreno (PPCPMe3, PPCAMe800 y PPCA801y1000) así como para porcentaje de píxeles de espacios naturales protegidos (PPANatur).

Resultados obtenidos mediante la técnica RGP

Los modelos obtenidos mediante RGP muestran un ligero aumento del R^2_{aj} , en todos los casos, frente a la RLM; lo que implica que una pequeña proporción de la varianza no explicada por los modelos globales ha sido capturada mediante la estimación basada en esta técnica.

VARIABLES	GTUC		GUEA		GZIC		GT	
Modelos	PLS	RGP	PLS	RGP	PLS	RGP	PLS	RGP
Coefficientes	Beta	B	Beta	B	Beta	B	Beta	B
Intercepto		-17.100		-4.479		-2.834		-17.637
DensPob	-0.083	0.000	1.118	0.000	-0.533		-0.474	-0.001
CrecPob	-1.214	-0.0286*	2.790	0.0180*	0.113		-0.569	0.023
CrecEmp	2.033	0.024	-0.807		1.276	0.0049**	1.401	-0.030
PlncrViv	-1.249	-0.017	-1.547	-0.026	-2.164	-0.0054**	-2.235	-0.029
PlncRnBruta	-0.339	-0.024	0.435	0.020	-0.965	-0.031	0.052	
Denscar	0.169	0.163	-0.260		-0.527	0.952	-1.026	-1.087
Denscarnaco	0.759	1.020	-0.590		2.962		1.819	2.252
Purbanizable	0.538	0.051	-0.948	-0.044	1.099	0.026	0.355	0.022
Pvotoizq	0.765	0.036	-1.600	0.017	0.591	-0.007	1.151	0.053
DMCar	-2.626	-0.003	-0.726		-2.782		-3.924	-0.005
DMCarnaco	2.510	0.002	-2.442		2.450		3.672	0.003
DMHosp	0.122		-0.264		-0.046		0.066	
DMCom	19.103	0.003	-9.013		28.122	0.001	19.644	0.003
DMUniv	-16.525	-0.002	-4.293	0.000	-16.427	-0.001	-16.870	-0.003
DMInstND	0.384	0.000	0.928		2.057	0.0004***	0.443	
DMBosq	-1.004	0.000	3.522	0.000	-2.845		-2.653	-0.001
DMHid	3.685	0.002	-1.742		4.587		5.780	0.003
DMANatur	-4.806	-0.001	-2.338	0.000	-6.240	0.000	-5.318	-0.001
DMCentNeg	2.105		16.766		-8.455		-0.373	
PPCVBosq	0.581	0.010	2.778	0.036	0.384		0.538	
PPCVNatur	0.346	0.005	0.557	0.008	-1.981	-0.010	0.817	0.027
PPCVEmb	0.302	0.029	0.448		0.207		0.033	

PPANatur	2.250	0.065	-0.401	-0.020	3.125	0.026	1.405	0.0415*
PPOSur	-1.029	-0.065	-1.493	-0.026	0.557		-0.336	-0.019
PPCPMe3	-0.926	-0.016	-2.225	-0.018	0.779		-0.528	-0.0076*
PPCPe3y6	-0.831	-0.041	-1.279		0.135		-0.453	
PPCAME800	10.374	0.204	2.664	0.034	10.233	0.049	10.204	0.235
PPCAe801y1000	4.134	0.139	1.001	0.015	5.020	0.042	3.342	0.1168*
PPCAMa1201	1.135	0.077	0.890		0.554		0.913	0.079
R² (PLS/RGP)	0.999	0.998	0.998	0.954	0.952	0.843	0.989	0.957
R²_{aj} RGP		0.990		0.897		0.666		0.908
Akaike RGP	1097.69		83.49		43.91		225.75	
R²_{aj} RLM	0.9894		0.8889		0.6353		0.8980	
Akaike RLM	779.56		72.22		40.08		198.23	

Tabla 2. Resultados obtenidos para la PLS y para la regresión global obtenida tras aplicar la RGP, también se muestra el R²_{aj} obtenido para la RLM. Se han remarcado mediante * las variables significativas al 10%, ** significativas al 5% y *** significativas al 1%, para el test de Hope.

Pese a que no se ha estimado oportuno aportarlo en el presente documento, cabe mencionar que los sumatorios de los residuos al cuadrado obtenidos mediante la RGP, ha resultado menor para todos los modelos, que los obtenidos vía RLM; paralelamente la prueba ANOVA indicó cambios en los sumatorios de los residuos, en todos los casos, significativamente diferentes de cero. Sin embargo, el coeficiente de Akaike (tabla 2) resultó mayor para los modelos obtenidos mediante RGP, por lo que se puede decir que pese a existir cierta mejora con el empleo de la RGP, sería más correcto utilizar, en este caso, los modelos obtenidos mediante regresión global; esto sería debido al menor número de parámetros efectivos utilizados por la RLM.

La variable CrecPob se ha mostrado como la única con variabilidad espacial significativa, para los modelos GTUC y GUEA, resultando significativa al 99% para todo el territorio e incidiendo de modo negativo para GTUC y de modo positivo en el caso de GUEA (figura 2).

En el caso del modelo GZIC, se ha encontrado variabilidad espacial significativa para CrecEmp, PlncrViv y DMInstND, mostrándose significativas para todo el territorio al 99%. El parámetro estimado para CrecEmp incide de modo positivo para todo el territorio (Figura 2-3) y en mayor magnitud hacia el Sureste de la imagen. Por su parte la variable PlncrViv, incide de forma negativa, siendo en este caso su influencia más negativa hacia el Sureste de la imagen.

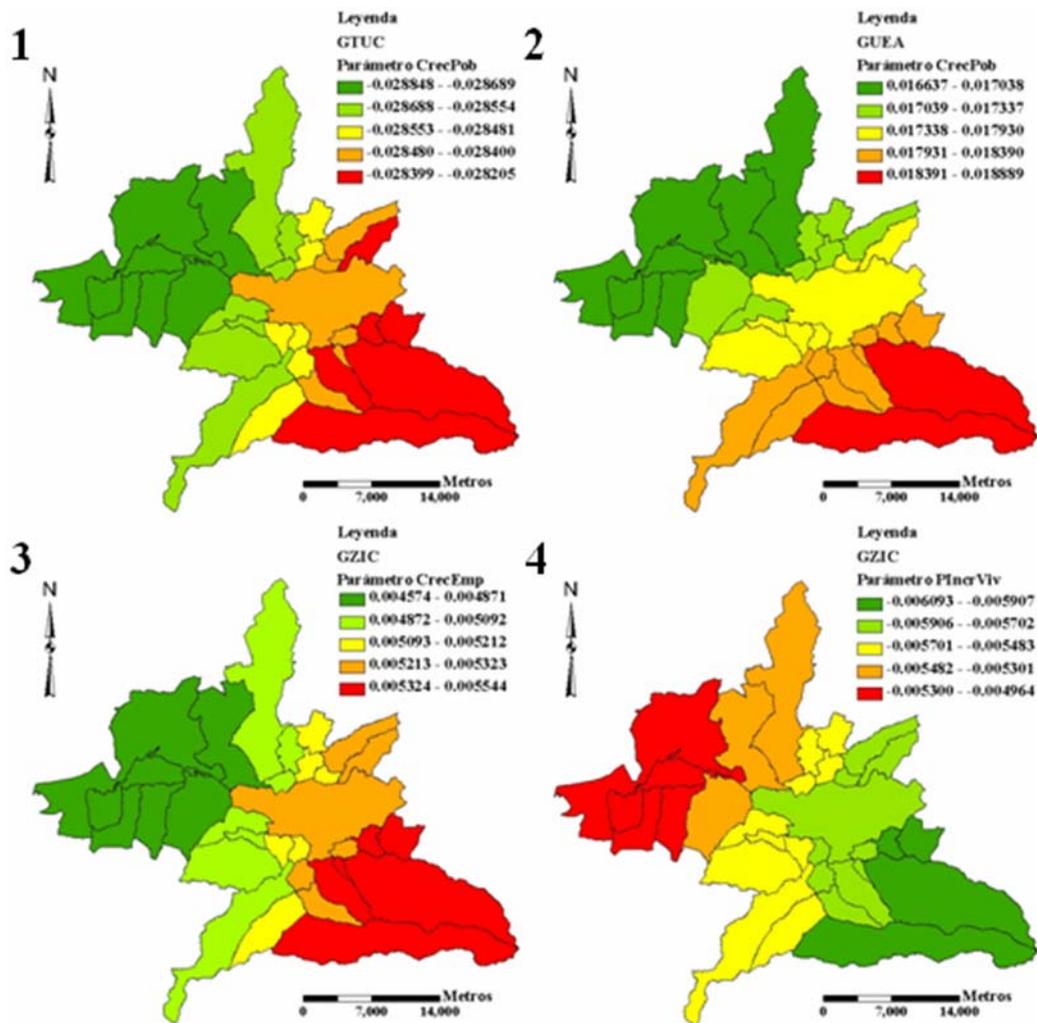


Figura 2. Se muestra los parámetros obtenidos para CrecPob, para los modelos GTUC y GUEA, así como para CrecEmp y PIncrViv, para el modelo GZIC.

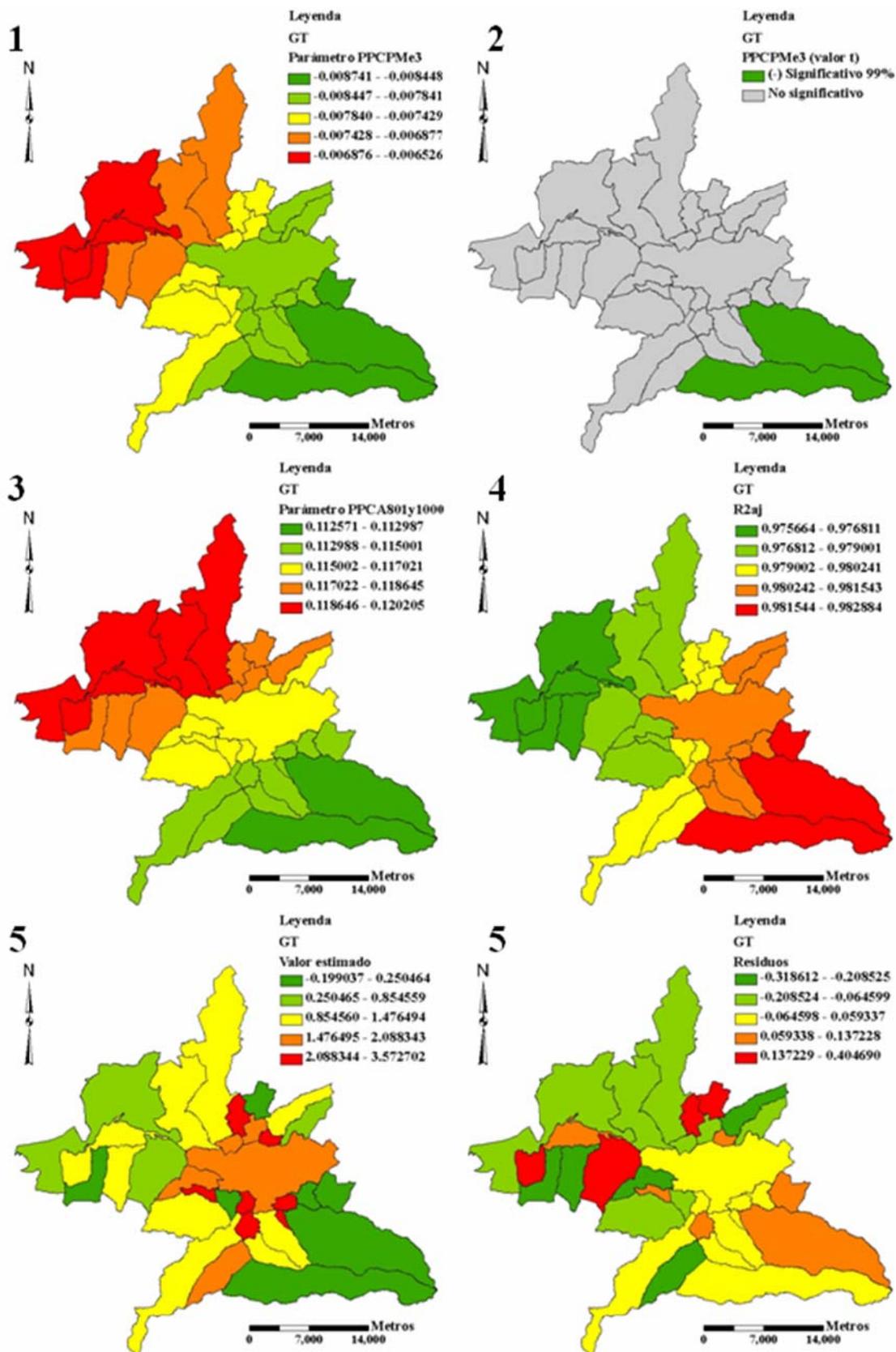


Figura 3. Se muestran el parámetro estimado para la variable PPCPM3 (1) y su significación (2). Por otro lado, se incluye el parámetro PPCA801y1000 (3), el R^2_{aj} (4), el valor estimado (5) y los residuos generados (6); todo ello para el modelo GT.

Observando los resultados obtenidos para el modelo GT (tabla 2), se encuentran un total de tres variables con variabilidad espacial significativa, PPANatur, PPCAe801y1000 y PPCPMe3. Puede observarse cómo el parámetro estimado para la variable PPCMe3 adquiere valores negativos para todo el territorio (Figura 3-1) sin embargo, sólo sería significativo para dos municipios al Sureste de la imagen (Figura 3-2), a un nivel del 90%. Para concluir, decir que es en estos municipios dónde el parámetro toma valores más negativos, por lo tanto, el crecimiento no se estaría dando en pendientes bajas, como sería lo lógico. Esto no es de extrañar si se observa la figura 1, dado que son estos municipios los que se sitúan en un terreno más alto y escarpado; lógico entonces que el parámetro estimado sólo se muestre significativo para ellos.

Atendiendo a la figura 3-4, puede observarse cómo los valores obtenidos para el R^2_{aj} son muy altos para todos los municipios, ajustándose mejor hacia el Sureste de la imagen. Por otro lado (figura 3-5), el modelo subestima el crecimiento de los municipios que se encuentran al Norte y sobrestima el crecimiento de los municipios más al Sur. Por último (figura 3-6), se encuentra que los mayores crecimiento estimados pertenecen a los municipios limítrofes al de Granada (centro de la imagen).

Resultados obtenidos mediante RLE.

Atendiendo a la tabla 3, podemos asumir que los resultados del análisis RLE son bastante buenos, obteniendo ajustes para el estadístico ROC entre 0.92 y para el PPCC1 entre 86.6 y 93.85%.

Con la finalidad de hacer más clara e intuitiva la explicación y por ende la aportación de cada variable a los modelos haremos uso de las gráficas de probabilidades.

MODELOS	GTUC		GUEA		GZIC		GT	
Variables	BETA	Exp(β)						
Intercepto	1.182		2.611		3.259		2.942	
DensPob	-0.094	1.000	-0.036	1.000	0.490	1.001	-0.084	1.000
IncrViv	-0.108	0.992	-0.092	0.992	0.082	1.007	-0.114	0.991
IncrRenBruta	0.107	1.035	0.030	1.010	-0.338	0.882	0.039	1.012
Denscar	-0.073	0.659	0.098	1.492	0.202	3.066	0.050	1.273
Purbanizable	0.146	1.075	-0.057	0.974	0.065	1.045	0.071	1.034
Ayunizq	0.148	3.076	-0.076	0.573	-0.070	0.570	0.059	1.587
Dist_hosp	-0.722	0.999	-0.004	1.000	0.757	1.001	0.303	1.000
Dist_Urb1990	-1.883	0.997	-1.200	0.998	-1.466	0.998	-1.352	0.998
Dist_TUC	-3.056	0.997	-0.208	1.000	-1.372	0.999	-0.470	1.000
Dist_cbd	-0.112	1.000					-0.317	1.000
Dist_uea			0.000	0.998				
Dist_ZIC					-0.015	1.000		
Dist_Carret	-0.811	0.998	0.509	1.001	-0.338	0.999	0.046	1.000

Dist_hid	-0.210	1.000	0.345	1.001	2.028	1.003	0.779	1.001
CVBosq	0.189	4.688	0.043	1.396	0.198	4.515	0.061	1.664
CVEmb	-0.653	0.000	0.068	2.604	-0.869	0.000	0.009	1.186
AreaNatur	0.000	1.003	-0.434	0.011	-2.226	0.000	-0.254	0.058
CVAreaNatur	0.076	1.649	0.036	1.269	-0.438	0.049	-0.061	0.669
OrienSur	-0.071	0.628	-0.074	0.397	0.068	1.927	-0.007	0.926
Pendiente	0.039	1.009	-0.336	0.919	-0.111	0.974	-0.102	0.975
Altura	0.144	1.001	0.058	1.001	-0.236	0.998	-0.082	0.999
ROC	0.964		0.953		0.931		0.923	
PPCC1	90.603		93.851		86.515		88.563	

Tabla 3. Resultados obtenidos para la RLE.

De esta manera, si observamos la gráfica 1 (figura 4), se observa cómo la distancia a zonas urbanas es un factor determinante en el crecimiento de las categorías analizadas, resultando que a mayor distancia existe menor probabilidad de que se establezcan nuevas zonas urbanas. Del mismo modo, la probabilidad disminuye con la distancia a carreteras (gráfica 2) sin embargo, en este caso, no resultaría determinante para las categorías GUEA y GT.

Por otro lado, en la gráfica 3, puede observarse cómo la distancia a la categoría TUC (tejido urbano continuo) es un factor relevante para todas las categorías analizadas; disminuyendo la probabilidad de crecimiento con la distancia a las zonas de tejido urbano.

Cabe destacar que la pendiente parece mostrarse como un factor relevante solamente para la categoría urbanizaciones exentas y/o ajardinadas, siendo su influencia mucho menor para el resto de variables (gráfica 4). Por otro lado, la altitud del terreno (gráfica 5) resulta un factor determinante para el establecimiento de nuevas zonas industriales y en menor medida para la variable GT. En todos los casos mencionados, la probabilidad disminuía con el aumento de la altitud o de pendiente, para las variables citadas.

Puede observarse, en la gráfica 6, cómo la densidad de población es un factor significativo para las categorías GTUC, GUEA y GT; el resultado muestra que a mayor densidad de población menor probabilidad de crecimiento.

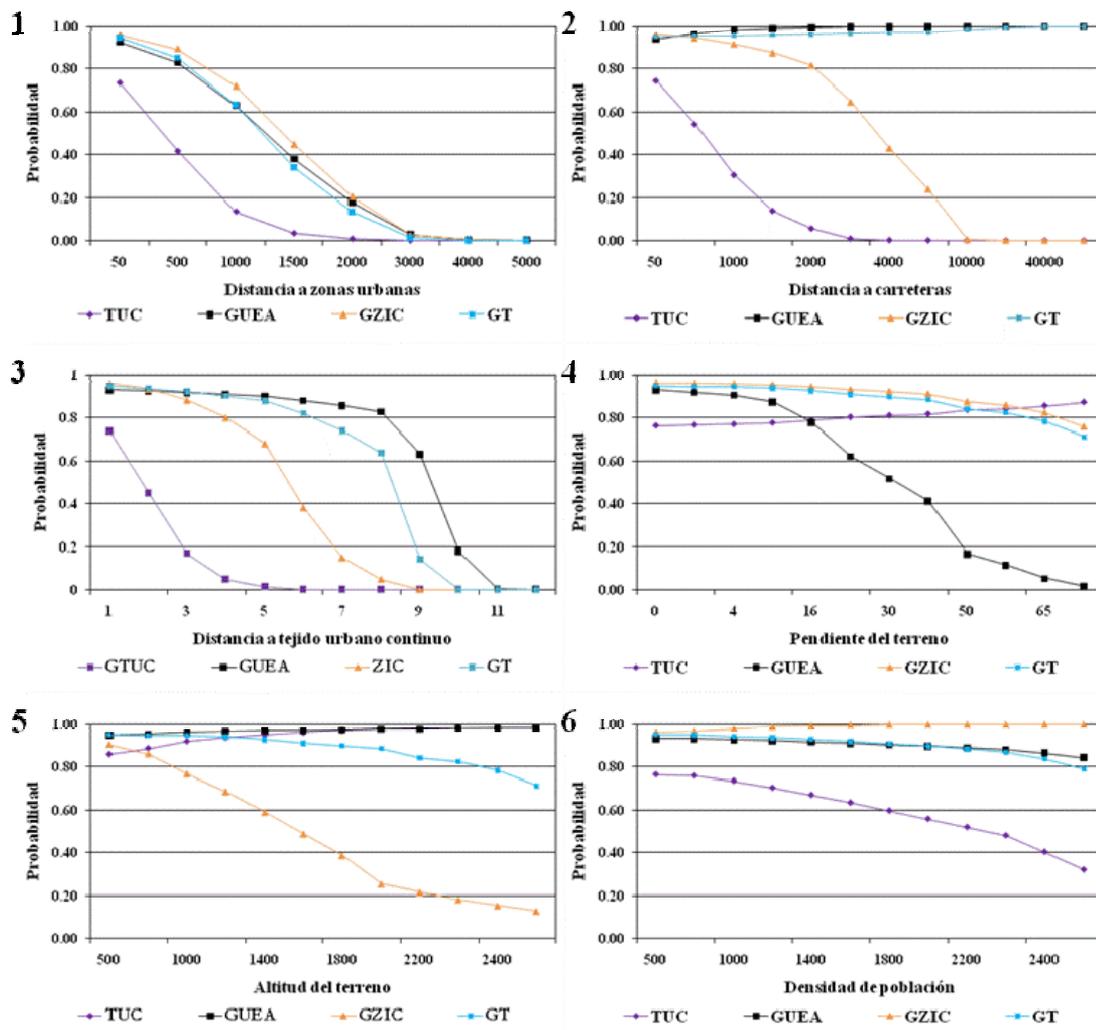


Figura 4. Probabilidades de crecimiento urbano para las diferentes categorías analizadas.

Con respecto al resto de variables y tomando en consideración los coeficientes estandarizados, observamos que no tienen un peso considerable en los modelos ajustados. No obstante, destacar la influencia de la visibilidad a los embalses sobre el tejido urbano continuo y zonas industriales; aunque este hecho parece puramente casual, dada la existencia de un embalse en el centro del área de estudio. Por último, son también de mención, los coeficientes estandarizados para la variable IncrRenBruta para el modelo GZIC; disminuyendo la probabilidad con el incremento de renta.

DISCUSIÓN

El método de regresión por mínimos cuadrados parciales (PLS), muy poco aplicado hasta el momento en análisis que implican el estudio de variables espaciales (Zhang, Z. et al., 2007; Aguilera y Garrido, 2001), subsana algunos de los problemas de autocorrelación y multicolinealidad de la RLM, puesto que las exigencias en cuanto a escala de medida, tamaño de la muestra y distribución de las variables son mínimas. Los modelos estimados mediante PLS han complementado los resultados estimados para la RLM y la RGP aportando al análisis nuevas variables explicativas; obteniéndose coeficientes de determinación más elevados.

Mediante el empleo de la RGP, se han obtenido modelos con coeficientes de determinación más elevados que los obtenidos vía RLM; sin embargo la especificación tipo RGP, que reconoce variabilidad espacial del fenómeno, no ha resultado mejor que la formulación clásica, que supone absoluta homogeneidad espacial. En este sentido, se piensa que el problema puede haber radicado en el bajo número de muestras (32), que reducirían la espacialidad de las variables; dado que, en la bibliografía consultada, muestras de más de 100 puntos eran consideradas pequeñas para el ajuste de la RGP (Collazos *et. al.*, 2006; Fotheringham *et al.*, 2002). De este modo, con mayor número de puntos las diferencias entre RGP y RLM deberían hacerse más significativas. No obstante, el empleo de la RGP ha permitido una mejor interpretación espacial de los resultados obtenidos por medio de la RLM gracias a la posibilidad de representación mediante mapas de los resultados obtenidos; pudiéndose comprobar de este modo cómo ha sido el ajuste de los modelos de forma local para todo el ámbito de estudio.

El análisis cuantitativo del crecimiento urbano que se produce en un territorio y la relación que tiene con determinados factores, conlleva habitualmente la incorporación al estudio de una gran cantidad de variables de muy diversa índole (socioeconómicas, biofísicas, de proximidad, etc.) que suelen estar referidas a distintas unidades espaciales, siendo los límites municipales y el píxel los más utilizados. Mediante el empleo de la RLE se encuentran menos problemas de autocorrelación y multicolinealidad, debido a que la muestra de observaciones es mucho mayor, ya que se trabaja a nivel píxel.

Atendiendo a los resultados obtenidos para la Comunidad de Madrid en estudios realizados con anterioridad (Plata *et. al.*, 2008b y c), cabe destacar el mayor ajuste de los modelos obtenidos mediante PLS, entre un 30 y 40% superior; la explicación radicaría en el bajo número de muestras del presente trabajo (32 municipios frente a los 179 de la Comunidad de Madrid) y a que el territorio madrileño presenta una mayor heterogeneidad en cuanto a los factores que influyen en el crecimiento urbano de la región. Es necesario recordar en este punto, que en el trabajo realizado para la Comunidad de Madrid una de las categorías analizadas era Estructura Urbana Laxa, mientras que la cartografía del *Corine Land Cover* correspondiente al Área de Granada no poseía dicha categoría, apareciendo en su lugar la categoría Tejido Urbano Continuo.

Los cálculos realizados para el modelo correspondiente a Estructura Urbana Laxa en la Comunidad de Madrid, mostraban como principales factores la densidad de población, de modo positivo, así como la distancia media al centro de negocios, con incidencia negativa; de forma que la mayor expansión para la citada categoría se había producido en los municipios con mayor crecimiento de población y más próximos al centro de negocios. En el Área metropolitana de Granada, para la categoría Tejido Urbano Continuo (que se supone debe describir el mismo fenómeno de expansión urbana) se ha encontrado una incidencia contraria de ambas variables. Observando la Figura 1, se encuentra que gran parte del crecimiento de la citada categoría se ha situado al Noroeste de la imagen, así como en municipios próximos al de Granada; por lo tanto con menor densidad de población y alejados del centro de negocios.

Para el crecimiento de urbanizaciones exentas y/o ajardinadas se había encontrado, en Madrid, una clara incidencia positiva del porcentaje de suelo urbanizable, porcentaje de píxeles en Espacios Naturales Protegidos y en menor medida del crecimiento de población y del nivel de renta. En el caso actual, se encuentra que las relaciones tienen el mismo sentido para todos los casos, menos para porcentaje de suelo urbanizable, variable que tendría un efecto negativo, de forma que se daría mayor crecimiento de urbanizaciones exentas y/o ajardinadas en los municipios con menor porcentaje de suelo urbanizable. Cabe mencionar que para el Área Metropolitana de Granada se han encontrado la distancia al centro de negocios, proximidad a las zonas comerciales y visibilidad a bosques como factores más relevantes. En este sentido se podría estar asistiendo al establecimiento de "ciudades dormitorio".

Para las zonas industriales, en la Comunidad de Madrid, cabe destacar la densidad de población o las bajas pendientes, como variables más importantes; sin embargo, en nuestro caso encontramos un efecto negativo de la densidad de población.

En el caso de todas las categorías en conjunto, GT, para la Comunidad de Madrid, la densidad de población, el crecimiento de población, el porcentaje de suelo urbanizable, la distancia a universidades, proximidad a hospitales y al centro de negocios, se erigieron como factores más relevantes. De entre las anteriores variables, la distancia a universidades es la que ha mostrado una mayor influencia en el presente trabajo, pero en este caso el crecimiento ha sido mayor en las zonas próximas a las universidades; cabe destacar el hecho de que el crecimiento de población muestre una relación negativa. El hecho es, que ha habido un decremento de la población en el municipio de Granada, en la década de los 90 (Sánchez, 2005), así como un fuerte envejecimiento de la población; lo que vendría a explicar el último punto.

Atendiendo a los resultados obtenidos mediante RLE se encuentran ajustes similares para las dos áreas de estudio, siendo mayores los PPCC1 y ROC calculados para el Área Metropolitana de Granada, en todos los modelos. En ambos casos la proximidad a zonas urbanas preexistentes, la proximidad a carreteras y las mejores condiciones orográficas (menor pendiente y altitud) aparecen como factores relevantes. Sin embargo, en nuestro caso, se encuentra que la probabilidad de establecimiento de nuevas zonas urbanas disminuye con la densidad de población, al contrario que en la Comunidad de Madrid; en la Figura 1, puede observarse cómo ha habido muchas zonas de expansión urbana alejadas del municipio de Granada o hacia el oeste del mismo, todas ellas zonas de baja densidad de población.

El Área Metropolitana de Granada ha mostrado factores explicativos comunes con la Comunidad de Madrid, pero con incidencias contrarias en muchos casos. La cuestión es que, en el trabajo actual, el área de estudio tiene una extensión sustancialmente menor; sin embargo, el crecimiento se reparte por todo el territorio, con un predominio de las nuevas zonas industriales en los municipios cercanos a Granada, zonas con baja densidad de población. Cabe destacar que el establecimiento de las nuevas urbanizaciones exentas y/o ajardinadas se ha dado principalmente en tres municipios del Sureste de la imagen (Ogijares, Alhendín y Otura), justo en los límites de las grandes áreas protegidas existentes en la zona; es de mención que el mayor crecimiento de población se ha experimentado también en estos casos. Todo parece indicar que en estos municipios se ha dado el fenómeno conocido como "ciudades dormitorio", con población que migra hacia estas zonas por menores requerimientos económicos y por características más naturales, alejados de los grandes núcleos urbanos, con una incidencia positiva sobre la actividad económica; llamaría la atención en este caso la relación negativa encontrada con el porcentaje de suelo urbanizable.

CONCLUSIONES

El uso de métodos estadísticos como el análisis de regresión múltiple, que utilizan como unidad de observación el municipio, presentan ciertos inconvenientes a la hora de estudiar fenómenos espaciales, pues puede producirse pérdida de información y presentar problemas de falacia ecológica (Serra *et al.*, 2005; Snijders y Bosker, 1999). Además, la presencia de multicolinealidad y autocorrelación en los modelos supone la exclusión de una gran cantidad de variables que pueden ser determinantes a la hora de comprender el crecimiento urbano. En este sentido, mediante el empleo de la PLS se han encontrado nuevas variables explicativas para todos los modelos, así como constatado el sentido de las relaciones que se habían establecido mediante los modelos estimados por la RLM, previos al cálculo de la RGP.

El uso de la RGP ha facilitado la interpretación de los resultados obtenidos mediante RLM o PLS, gracias a la elaboración de mapas, encontrándose variables que no eran significativas para todo el territorio; contribuyendo de este modo claramente en su análisis. No obstante, los modelos estimados mediante RGP no han aportado una mejora significativa frente a los RLM; debido al bajo número de puntos y a que los ajustes de los modelos RLM ya eran muy elevados.

Se han encontrado diferencias notables en cuanto a la aplicación de la metodología utilizada entre el Área Metropolitana de Granada y la Comunidad de Madrid, así como en los factores que han guiado el crecimiento en ambas zonas.

La RLE permitió incluir las dos unidades de observación a nivel píxel; obteniéndose resultados consistentes en los modelos, objetivos y de fácil interpretación. En este sentido, quedaría para posteriores trabajos el estudio de la interacción entre las dos unidades de observación, con por ejemplo la Regresión Logística Multinivel (Plata *et al.*, 2008c)

Por último, con el uso de todos los métodos, se ha podido comprobar, que variables tales como: la densidad y el crecimiento poblacional, la distancia a zonas comerciales, la distancia a universidades, la distancia a vías de comunicación, la distancia a las zonas urbanas existentes, la pendiente, la altitud del terreno o el porcentaje de superficie urbanizable disponible en cada municipio, son determinantes a la hora de tratar de entender las lógicas que guiaron el crecimiento urbano en el Área Metropolitana de Granada.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agresti A. y Finlay B. 1997. *Statistical methods for the social sciences*. 3rd edition. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, USA.
- Aguilera Aguilera, P. y Garrido Frenich, A. (2001): Aplicaciones ambientales del análisis multivariante. Monografías Ciencias y Tecnología 13, *Servicio de publicaciones de la Universidad de Almería*.
- Alciaturi, C. E.; Escobar, M. E. y De La Cruz, C. (2005): Partial least squares (PLS) regression and its application to coal analysis. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad de Zulia*, 26 (3), 197-204.
- Bocco, G.; Mendoza, M. y Masera, O. (2000): La dinámica del cambio del uso del suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 44, 18-38.
- Brudson, C. A.; Fotheringham, S. y Charlton, M. (1998): Spatial Nonstationarity and Autorregressive Models. *Environment and Planning A*, 30, 1905-1928.
- Cheng, J. y Masser, I. (2003): Urban growth pattern modelling: a case study of Wuhan city, PR China. *Landscape and Urban Planning*, 62, 199-217.
- Conway Tenley, M. (2005): Current and future patterns of land-use change in the coastal zone of New Jersey. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 32, 877-893.
- Collazos, R.E.; Gamboa, P.W.; Prado, V.P.; y Verardi, V. (2006). "Análisis espacial del precio de oferta de la vivienda en el área metropolitana de Cochabamba". *Revista Latinoamericana de Desarrollo Económico*. Num. 6, pp.33-62.
- European Environment Agency (2006): Urban sprawl in Europe, the ignored challenge. *EEA Report No 10/2006*.
- Fotheringham, A.S.; Brunsdon, C. y Charlton, M. (2002). *Geographically Weighted Regression: The Analysis of Spatially Varying Relationships*. Wiley Sons
- Hoshino, S. (2001). Multilevel modeling on farmland distribution in Japan. *Land Use Policy*, 18 (1), 75-90.
- Hu, Z. y Lo, C.P. (2007): Modeling urban growth in Atlanta using logistic regression. *Computers, Environment and Urban Systems*, 31, 667-688.
- Lesschen, J. P.; Verburg, P.H. y Staal, S. J. (2005): Statistical methods for analysing the spatial dimension of changes in land use and farming systems. *LUCC Report Series 7*, Wageningen University, the Netherlands.
- Menard, S. (2002): Applied logistic regression analysis, Second Edition. *SAGE Publications*.
- Montgomery, D.; Elizabeth P. y Geoffrey V. (2005): Introducción al análisis de regresión lineal. *Compañía Editorial Continental*, México.
- Pan William K.Y. y Bilsborrow Richard E. (2005). "The use of a multilevel statistical model to analyze factors influencing land use: a study of the Ecuadorian Amazon", *Global and Planetary Change*, 47, 232- 252.
- Plata Rocha, W.; Gómez Delgado, M. y Bosque Sendra, J. (2008a). Análisis de los cambios de uso del suelo en la Comunidad de Madrid para el periodo de 1990-2000. *Scripta Nova*, Universidad de Barcelona.
- Plata Rocha, W.; Gómez Delgado, M. y Bosque Sendra, J. (2008b). Análisis de factores explicativos del crecimiento urbano en la Comunidad de Madrid a través de métodos estadísticos (RLM y PLS) y SIG. *XIII Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica*, pp. 121-134, Las Palmas de Gran Canaria, España.
- Plata Rocha, W.; Gómez Delgado, M. y Bosque Sendra, J. (2008c). Análisis de factores explicativos del crecimiento urbano en la Comunidad de Madrid a través de métodos estadísticos (RLO y MLA) y SIG. Presentado al *XIII Simposio Latinoamericano de Percepción Remota y Sistemas de Información Espacial*, La Habana, Cuba, y publicado en la *Revista de Planeamiento Territorial y Urbanismo Iberoamericana*, Num. 0, España.
- Sánchez González, D. (2005) El proceso de envejecimiento demográfico en Granada y en su área metropolitana. *Cuadernos Geográficos*.
- Serra, P.; Pons, X. y Sauri, D. (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 de la Universidad Complutense, 25, 259-278.

Snijders, T. y Bosker, R. (1999). *Multilevel Analysis. An introduction to Basic and advanced multilevel modelling*. SAGE Publications.

Verburg P. H.; Ritsema van Eck, J. R.; de Nijs, T. C.M.; Dijst, M.J. y Schot P. (2004): Determinants of land-use change patterns in the Netherlands, *Environment and Planning B: Planning and Design*, 31, 125-150.

Wold, S.; Trygg, J.; Berglund, A. y Antti, H. (2001): Some recent developments in PLS modelling. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 58, 131-150.

Zhang, Y.; Zhou, Ch.; y Zhang, Y. (2007): A partial least-squares regression approach to land use studies in the Suzhou-Wuxi-Changzhou region, *Journal of Geographical Sciences*, 17 (2), 234-244.