

Recibido: 30-06-2017
Aceptado: 10-11-2017

IDENTIFICACIÓN DE PATRONES ESPACIALES DEL BORDE URBANO

MEDIANTE MAPAS AUTO-ORGANIZADOS DE LA CENTRALIDAD DE LA RED VIARIA

THE IDENTIFICATION OF SPATIAL PATTERNS IN CITY LIMITS THROUGH
SELF-ORGANIZED MAPS OF THE CENTRALITY OF THE ROAD NETWORK

FRANCISCO JAVIER ABARCA-ALVAREZ 1
ROCÍO PÉREZ-CAMPAÑA 2
RUBEN TALAVERA-GARCIA 3

- 1 Doctor Arquitecto
Universidad de Granada. España
Profesor Ayudante Doctor Departamento de Urbanística y Ordenación del Territorio
fcoabarca@ugr.es
- 2 Doctora en Ciencias Ambientales
Universidad de Granada. España
Colaboradora Departamento de Urbanística y Ordenación del Territorio
rociopc@ugr.es
- 3 Doctor en Ciencias Ambientales
Universidad de Granada. España
Colaborador Departamento de Urbanística y Ordenación del Territorio
rtalaverag@ugr.es

DOI: <https://doi.org/10.22320/07183607.2017.20.36.02>

La caracterización morfológica del borde urbano es un ejercicio que reviste especial interés porque, por una parte, ayuda a entender los crecimientos urbanos que tienen lugar en las periferias y, por otra, permite descifrar claves de las relaciones de continuidad o discontinuidad que existen entre la ciudad y su entorno. En este contexto, son muchos los enfoques desde los que se puede realizar este ejercicio de análisis. En este artículo, se exploran en concreto las posibilidades que ofrece la utilización de mapas auto-organizados, elaborados a partir de los resultados obtenidos de la aplicación de medidas de centralidad de la red viaria mixta que forman los sistemas de calles, los viarios metropolitanos y los caminos agrarios. La aplicación de diferentes medidas de centralidad en una red viaria mixta, supone en sí un ejercicio innovador, ya que, normalmente, los análisis de centralidad se aplican en ámbitos más puramente intraurbanos. La representación espacial de los perfiles obtenidos en los mapas muestra diferentes características estructurales a lo largo del borde urbano, a partir de los cuales se puede interpretar la naturaleza del propio borde. La metodología propuesta se ha testeado en la ciudad de Granada (España), específicamente, sobre el borde de contacto de la ciudad con el entorno de la Vega de Granada, un paisaje agrario singular ligado al Río Genil.

Palabras clave: áreas suburbanas, inteligencia artificial, mapas, morfología urbana, infraestructura vial.

The characterization of city limits is of especial interest since it may provide hints to understanding the urban growth taking place in peripheries, and it also makes it possible to identify the keys to the continuous and discontinuous relationships between cities and their surroundings. Within this context, many different approaches could be adopted to undertake this kind of analysis. This paper specifically explores the possibilities offered by the use of self-organized maps created from the results of the application of different centrality measures in the mixed road network, which is comprised of systems of streets, metropolitan roads and rural roads. The implementation of centrality measures to a mixed road network is already an innovative exercise, considering that centrality analyses are normally carried out in more purely intra-urban contexts. The spatial representation of the profiles obtained with the self-organized maps shows different structural characteristics throughout city limits, which can be used to interpret the nature of the boundary itself. The proposed methodology was tested in the city of Granada (Spain), specifically on the limit in contact with the area surrounding the Vega de Granada, a singular agricultural landscape linked to the Genil River.

Keywords: suburban areas, artificial intelligence, maps, urban morphology, road infrastructure

I. INTRODUCCIÓN

El interés por las periferias urbanas, las zonas de borde y de transición urbano-rural ha estado presente en el urbanismo y la geografía desde hace más de un siglo. Patrick Geddes, en 1915, ya auguraba la relevancia de los bordes urbanos: “hagamos que el campo conquiste la calle, no sólo que la calle conquiste al campo” (2009: 212). Metodológicamente, trabajar con las periferias, los bordes y las transiciones, implica trabajar con cierta idea de límite. Así lo describe Gilles Clément en su *Manifiesto del Tercer paisaje*, cuando anota cómo se materializan los límites, a los se debe entender como un “grosor” y no como un “trazo”, y cuando integra, asimismo, la imprecisión en su representación (2007: 62), consolidando un “lugar” común de encuentro entre lo urbano y el campo: el paisaje. De forma práctica, Andrés Duany y Elizabeth Plater Zyberk han representado soluciones sociales y físicas de este límite “grueso”, codificando la sección urbana en su *Transect* (2003). Lo propio han llevado a cabo André Corboz (2004) y Giuseppe Dematteis (2004), explorando los valores semánticos e informativos de estos conceptos. Son espacios de complejidad y oportunidad; espacios de superposición de elementos sobre los paisajes tradicionales (Antrop, 2005), por lo que aparecen rasgos periurbanos y nuevos territorios multifuncionales (Ravetz Fertner y Nielsen, 2013). De ese modo, es posible encontrar tejidos residenciales, áreas industriales, parcelas agrícolas, parques, proyectos residenciales o industriales abandonados, elementos del paisaje agrícola, vegetación remanente o espontánea, etc.

En este contexto, la identificación de estos bordes resulta de interés para conocer aspectos del propio crecimiento urbano, de su estructura, de su continuidad, de la relación de los espacios urbanos con su entorno periurbano; y su caracterización podría abordarse desde diferentes enfoques y métodos. En este sentido, para la comprensión de ese límite “grueso”, los viarios urbanos y periurbanos son cruciales, por su capacidad estructurante y canalizadora de flujos. Metodológicamente, el análisis de redes (*network analysis*) permite caracterizar esta red espacial mixta, urbano-rural, formada por los sistemas de calles y su continuidad hacia redes de viarios metropolitanos y caminos rurales. Este análisis de redes consiste en la recolección, gestión, análisis, interpretación y presentación de datos relacionales (Brandes *et al.*, 2013), y tiene su origen, sobre todo, en redes sociales, extendiéndose más recientemente a estudios urbanos y regionales (Porta, Crucitti y Latora, 2008; Sevtsuk y Mekonnen, 2012a). Desde los trabajos de Hagget y Chorley (1972) sobre la aplicación geográfica del análisis de redes, la mayoría de las contribuciones en este ámbito han sido teóricas. La aplicación práctica vino de la mano de la sintaxis espacial (Space Syntax) con Hillier y Hanson en 1984 (Porta, Crucitti y Latora, 2006). En especial, la centralidad ha sido uno de los conceptos más estudiados en los análisis de redes (Agryzkov, Tortosa y Vicent, 2016), usándose para mostrar la estructura interna de diferentes tipos de redes (Krafta, 2008). Diversos trabajos urbanos y geográficos (e.g. Christaller, 1966) han ayudado a entender

el poder de atracción o diseminación que determinados elementos tienen en el contexto urbano en función de su naturaleza o su localización (Choay, 2006). Hasta el momento, la mayoría de los estudios se concentran en lo urbano (Liu *et al.*, 2015), entre ellos: Lämmer, Gehlsen y Helbing (2006) que analiza la centralidad de veinte ciudades alemanas, Jiang (2007) que lo hace en 40 ciudades americanas; Masucci *et al.* (2009) que se enfoca en el sistema de calles de Londres; Strano *et al.* (2013) que examina diez ciudades europeas; y Agryzkov, Tortosa y Vicent (2014) abocado a la ciudad de Murcia, España. Pese a que los análisis de centralidad se pueden aplicar a cualquier sistema espacial y a cualquier escala (Porta y Latora, 2007), no son muchos los ejemplos fuera del contexto puramente urbano. El trabajo de Liu *et al.* (2015) sí se desarrolla en un ámbito interurbano, en el área metropolitana de Wuhan, China. También el trabajo de Pérez-Campaña, Abarca-Álvarez y Talavera-García (2016) realiza una aplicación innovadora, al considerar una red espacial mixta, compuesta por el sistema de calles, viario metropolitano y caminos agrarios correspondientes al borde urbano de la ciudad de Granada (España), sobre la que se analiza la centralidad y potencialidad de determinados vacíos urbanos de carácter marginal localizados en este ámbito.

Los análisis de redes basados en la centralidad suelen aplicar diferentes medidas de la misma, explicando distintas características de la red, que se extrapolan después a los tejidos que articulan. Así, Porta *et al.* (2011) representa diversas medidas de centralidad de Barcelona, resultando cada una de las medidas explicativa de determinadas zonas de la ciudad. Cabe plantearse, no obstante, qué resultado tendría la integración simultánea de diferentes medidas de centralidad para explicar e incluso zonificar la estructura de un determinado espacio, ciudad o territorio. Para ello, se plantea el uso de una técnica de descubrimiento de conocimiento a partir de información y bases de datos, conocida como Knowledge Discovery in Databases (KDD). Una de ellas, de las más solventes, corresponde a los llamados Mapas Auto-organizados, Self-Organizing Maps (SOM), propuestos por Teuvo Kohonen (1982; 1989). La metodología SOM es una técnica de descubrimiento de conocimiento o de minería de datos consistente en redes neuronales artificiales. Procede del campo de la Inteligencia Artificial, y es muy eficaz y robusta en numerosas disciplinas, por sus capacidades para (i) mostrar y visualizar la información de partida de forma clara y ordenada y (ii) clasificar los sujetos de estudio en clases que no requieren su definición, caracterización o etiquetado nominativo previo. Frente a otras técnicas de descubrimiento de patrones, como por ejemplo el análisis clúster, la metodología SOM tiene la ventaja de (i) visualizar un gran conjunto de datos estadísticos (Kaski y Kohonen, 1996), (ii) mostrar las relaciones topológicas de similitud o de diferencia entre los sujetos en estudio, (iii) ser interpretables gráficamente y (iv) constituir por sí mismo un sistema de conocimiento de ayuda a la decisión para el análisis y visualización de indicadores estadísticos (ibidem). Así pues, los SOM como red neuronal de aprendizaje no supervisado, no precisan clases o categorías a predecir, sino que justamente tal

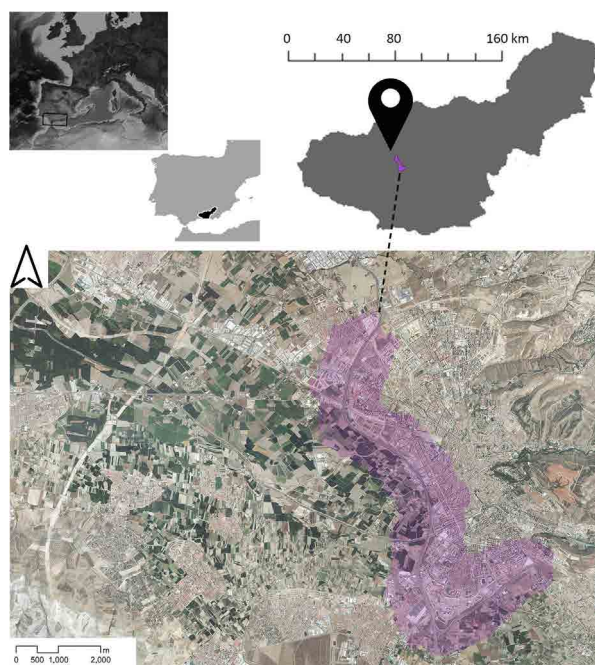


Figura 1. Localización del ámbito de estudio.
Fuente: Elaboración de los autores.

categoría, a modo de patrón, será uno de los resultados posibles de la metodología. De este modo, los SOM permiten, a partir de información desordenada, crear perfiles, proporcionando patrones visuales y formando un paisaje del fenómeno descrito por los datos (Kohonen, 1995). Comparado con otros métodos de reducción de dimensiones como el PCA (Análisis de componentes principales) o el MDS (escalado multidimensional), la capacidad de los SOM de preservar la topología de los datos hace que éste tenga un uso más eficiente del espacio disponible en la representación del mapa, con la consecuencia de una mayor distorsión en las distancias relativas (Skupin y Agarwal, 2008: 7). Por otro lado, los SOM presentan ventajas muy notables frente a otras técnicas, siendo relativamente insensibles a los valores perdidos y tolerando distribuciones no normales (Zhang, Shi y Zhang, 2009), lo que permite prescindir de verificaciones de difícil cumplimiento. Por otro lado, como método de clusterización, el SOM, si bien requiere mayor computación, es más robusto que, por ejemplo, el K-means.

Desde el origen de los SOM, en 1982, hasta 1995, es prácticamente inexistente su uso en Ciencias Sociales, Geografía, Urbanismo y Ordenación del Territorio. El propio Kohonen tuvo que demostrar las capacidades de los SOM en la Geografía Humana (Kaski y Kohonen, 1996), introduciendo la metodología a estas disciplinas. En este estudio seminal se utiliza el SOM para la representación de datos complejos sobre la distribución de la riqueza y la pobreza en el mundo, evidenciándose las similitudes

y diferencias entre múltiples países. A partir de este trabajo y en los siguientes 10 a 15 años se experimentará cierta eclosión en el uso de la metodología SOM, aunque aún es emergente y con numerosos campos abiertos de exploración.

Podemos encontrar algunas muestras relevantes del uso del SOM en el Urbanismo, la Planificación y Ordenación del Territorio, en investigaciones sobre la representación de las dinámicas temporales de la ciudad de Harrisburg en EE.UU (Takatsuka, 2001); en la identificación y caracterización del *urban sprawl* de Milán (Diappi, Bolchim y Buscema, 2004); en la clasificación de los tejidos urbanos a partir de indicadores morfológicos relacionados con la huella de las edificaciones (Hamaina, Leduc y Moreau, 2012); o bien, en la caracterización de tejidos urbanos del centro histórico de Santa Fe (España) para la creación de una ordenanza urbanística (Abarca-Álvarez y Fernández-Avidad, 2010).

En definitiva, con estas investigaciones se corrobora la creciente relevancia de la metodología SOM para el reconocimiento de patrones, la comprensión heurística y la generación de conocimiento a partir de información. Por ello, se plantea como hipótesis que el uso de los Mapas Auto-organizados sobre las medidas de centralidad puede contribuir a caracterizar ámbitos complejos de transición entre lo urbano y lo rural.

Desde tal óptica, el objetivo de este trabajo es la definición de un método, testeado sobre la ciudad de Granada, orientado a identificar patrones espaciales en el borde urbano-rural a partir de perfiles obtenidos mediante el empleo de Mapas Auto-organizados de medidas de centralidad espacial.

II. ÁMBITO DE ESTUDIO Y MATERIALES DE PARTIDA

El ámbito de estudio aquí propuesto corresponde a la ciudad de Granada, España, en concreto, el borde urbano en contacto con el paisaje agrario periurbano, Vega de Granada; un espacio ligado a la llanura de inundación del Río Genil (Figura 1). Se ha seleccionado este entorno por su riqueza en matices espaciales, al constituir este una transición ciudad-vega en la que confluyen el desarrollo urbano de una ciudad histórica como Granada, con su espacio agrario circundante, fuertemente marcado por su origen musulmán (Trillo San José, 2003), que ha dejado hondas repercusiones en la estructura de su paisaje. El elemento básico de partida es la red espacial formada por el sistema de calles de la ciudad y su continuación hacia viarios metropolitanos y la red de caminos agrarios. Esta delimitación no pretende constituir una identificación exacta de lo que constituye el borde urbano, sino simplemente una zona de testeo que incluye una red espacial de viarios mixtos. Respecto al material cartográfico, este ha sido obtenido a partir de datos disponibles, de acceso libre y gratuito, del Mapa Vectorial de Andalucía (Red de Información Ambiental de Andalucía 4), completándose con los

caminos agrarios mediante fotointerpretación y digitalización sobre ortofotografías de máxima actualidad del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA, con acceso desde la Red de Información Ambiental de Andalucía). La consulta y descarga de información se realizó entre enero y junio de 2016, resolviéndose las dudas de fotointerpretación mediante trabajo de campo. Por otra parte, para la digitalización, realización de análisis y diseño de cartografía se ha usado el software ArcMap (10.2), y para los análisis de centralidad, la herramienta *Urban Network Analysis for ArcGIS*, de *City Form Lab*. Por último, los Mapas Auto-organizados se han obtenido con el software *Viscovery SOMine 5.0.2.t*. a partir de los datos obtenidos anteriormente.

III. METODOLOGÍA

El trabajo se estructura en cuatro fases principales: (1) preparación del material de partida; (2) análisis de centralidad de la red viaria mixta urbano-rural del ámbito de estudio; (3) obtención de perfiles de centralidad (Mapas Auto-organizados); y (4) representación espacial de perfiles e interpretación de patrones espaciales.

FASE 1. Una vez obtenida la red espacial viaria mixta, según lo indicado en el apartado precedente, ésta se ha limpiado de errores mediante un análisis de topología realizado con ArcMap, permitiendo localizar posibles errores de digitalización.

FASE 2. Esta red se representa como un grafo espacial de tipo primario, en el que las intersecciones son consideradas como nodos y los segmentos (de calles, viarios y caminos) se consideran *links*. Sobre esta red se han aplicado tres medidas de centralidad (tres de las más comúnmente utilizadas, según la literatura consultada, señalada en la introducción): *closeness*, *betweenness* y *straightness*. Estas son tres de las cuatro medidas evaluadas por Pérez-Campaña, Abarca-Álvarez y Talavera-García (2016) en el borde urbano de Granada. Ahora bien, en el citado trabajo estas mediciones se ponen en relación con parcelas específicas en situación de abandono o marginalidad, por lo que en el presente artículo se han calculado de nuevo sobre un ámbito de estudio muy similar pero no condicionado por este último hecho. Las medidas se obtienen mediante la herramienta *Urban Network Analysis for ArcGIS* (ver Sevtsuk y Mekonnen, 2012b). No se reproducen aquí las ecuaciones correspondientes a cada una de las medidas (pueden ser consultadas en el manual de la herramienta), pero sí su significado:

-*Betweenness centrality*: o centralidad de intermediación (Analysis and Data Visualization in Net, 2016), se refiere al hecho de ser central por estar situado entre otros nodos (Porta, Crucitti y Latora, 2008). La relación entre dos nodos que no son adyacentes depende de otros nodos intermedios que, a su vez, se consideran especialmente importantes al tener este control estratégico o influencia sobre el

resto de nodos (Porta, Crucitti y Latora, 2006).

-*Straightness centrality*: o centralidad de rectilinealidad (ANVIDA, 2016), representa el hecho de ser central por ser de acceso directo a otros nodos (Porta, Crucitti y Latora, 2008), midiendo la rectilinealidad comparada con la longitud de los itinerarios más cortos entre nodos (Latora y Marchiori, 2007).

-*Closeness centrality*: centralidad de proximidad, alude al hecho de que un nodo sea central en el sentido de que está localizado próximo a otros nodos (Porta, Crucitti y Latora, 2008). Mide lo próximo que está un nodo respecto al resto de nodos de la red.

En todos los casos, las medidas se han calculado como medidas globales, lo que significa que no se ha incluido un radio específico de cálculo para su obtención.

FASE 3. Los valores de centralidad se integran conjuntamente mediante el empleo de Mapas Auto-organizados, creando un modelo de clasificación y conocimiento. En la creación del SOM, se lleva a cabo la clasificación y etiquetado a partir de los datos de centralidad de los nodos de viario y la generación de conocimiento posterior a través del análisis de los perfiles creados. Esta metodología hace posible clasificar sin atribuir *a priori* una etiqueta con definiciones y significados previamente atribuidos, permitiendo disminuir la enorme complejidad de los datos (Spielman y Thill, 2008), y, en ese sentido, reduciendo y clasificando la información (Hamaina, Leduc y Moreau, 2012).

Por otra parte, el agrupamiento, clusterización o clasificación de los datos se realiza mediante un análisis adicional Ward-clúster, generándose perfiles o prototipos mediante modelado de patrones y tendencias en la información (Weiss y Indurkha, 1998). A este respecto cabe indicar que la elección del número de perfiles resultantes depende del investigador, usándose aquí el criterio de detener el proceso cuando una nueva división no aporta conocimiento adicional al usuario. En nuestro caso, se ha establecido que cuatro perfiles son suficientes para caracterizar el borde urbano.

FASE 4. Esta fase de la metodología corresponde a la representación espacial de los perfiles, interpretación de resultados e identificación, donde existan, de patrones espaciales en el borde urbano basados en los diferentes valores de centralidad de los nodos de la red viaria mixta.

Para llevar a cabo esta fase, los resultados del SOM son de nuevo volcados al programa SIG, quedando cada nodo caracterizado por los respectivos valores de centralidad calculados y por el perfil al que pertenece el SOM. Este último paso permite la visualización espacial de los resultados y la evaluación de la coherencia espacial de tales patrones.

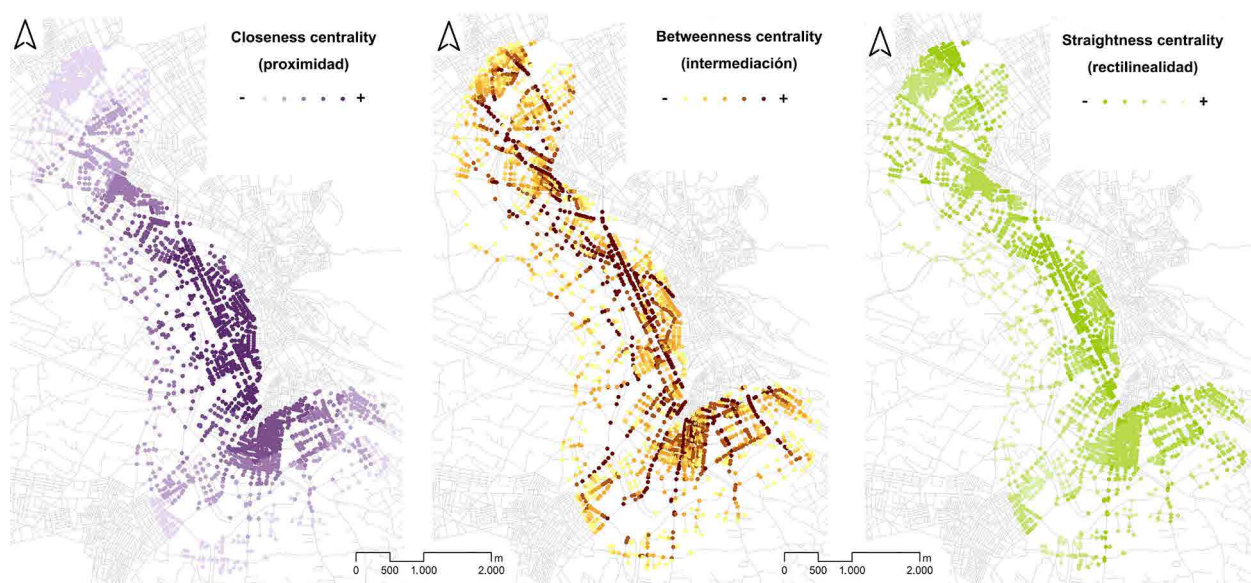


Figura 2. Representación cartográfica de los valores de centralidad para cada medida.
Fuente: Elaboración de los autores.

En aras de facilitar la comprensión de los perfiles obtenidos, se caracteriza cada clúster determinado por el análisis SOM con datos estadísticos básicos como son la Media, la Desviación Estándar, el máximo y el mínimo, obteniéndose principalmente dos resultados adicionales: (i) el factor o variable que es más importante para el efecto y (ii) el valor de tal factor (Wu y Hsiao 2015). Siguiendo las recomendaciones de la *American Statistical Association* (Wasserstein y Lazar, 2016), para cada variable y perfil, además de la significación estadística conseguida gracias a la prueba Test de Student bilateral ($p\text{-valor} \leq 0.05$), se calcula su Tamaño del Efecto (TE). En nuestro caso, el efecto se considera la pertenencia de los nodos a su perfil en cuestión, siendo, por tanto, el TE una medida de la influencia que tiene cada variable en la pertenencia de los nodos al perfil, atribuidos éstos anteriormente por la metodología SOM. El TE para cada variable que interviene en el perfil se indica de la siguiente manera: +++ efecto positivo grande, ++ efecto positivo medio, + efecto positivo bajo, - efecto negativo bajo, -- efecto negativo medio, --- efecto negativo grande (Cohen, 1998), a partir de lo cual se adquiere una información muy relevante del efecto que tienen las variables en la definición y singularidad de cada perfil.

Para el análisis e interpretación de los resultados, la caracterización de los perfiles y determinación de los patrones espaciales, además de la información estadística que los define, son valiosos los Self-Organizing Maps de variables, en cuanto que evidencian gráficamente la relación topológica entre los distintos nodos de viario estudiados, los patrones entre ellos y las diferentes variables de centralidad de los nodos del estudio.

IV. RESULTADOS

La aplicación de las medidas de centralidad da como resultado los mapas contenidos en la Figura 2.

No se han incluido los valores numéricos, puesto que no son determinantes en sí mismos para la posterior interpretación de resultados, sino que dichos valores se han reclasificado, en cada caso, empleando quintiles, con el fin de visualizar cinco niveles de centralidad para cada una de las medidas.

Realizando una lectura integrada de los valores obtenidos anteriormente, estos se agrupan en los perfiles SOM (Figura 3) a los que se ha incorporado información estadística descriptiva de la totalidad de instancias (2682 nodos) y la propia de cada perfil del modelo de clasificación calculado. Asimismo, se aportan en la tabla columnas con el valor del TE y de la confianza ($p\text{-valor}$) obtenida en la prueba Test de Student bilateral que se alcanza en cada variable para cada uno de los perfiles. En la Figura 3 se puede observar que, en la clasificación obtenida en 4 perfiles, la confianza obtenida en tal prueba es muy elevada para todas las variables. En la misma Figura se aprecia cuáles son las características singulares de cada perfil, marcadas como TE, dependiendo de su importancia. Se describen, a continuación, las principales características de tales perfiles, considerándose relevantes únicamente las estadísticamente significativas:

Perfil 1: Representa el 44.37% de los nodos viarios, presentando unos valores de 'Centralidad de proximidad' notablemente inferiores a la totalidad, que se cuantifican como TE medio. De igual forma, sus valores en la variable 'Centralidad de intermediación' alcanzan unos niveles ligeramente inferiores a la media: TE bajo.

Perfil 2: Incluye el 39.56% de los nodos y expresa una 'Centralidad de proximidad' muy elevada y TE grande. La 'Centralidad de rectilinealidad' alcanza niveles ligeramente superiores a la media, con TE bajo.

Perfil 3: Con el 6.71% de los nodos, este perfil representa valores elevados en las tres variables de centralidad y TE grande en todas ellas, sobresaliendo aquí unos valores de 'Centralidad de intermediación' con TE extremadamente altos, y el resto altos.

Perfil 4: Constituye el 9.36% de los nodos viarios. En todas las variables de centralidad se alcanzan valores menores que el conjunto de la muestra.

Por último, la adscripción de cada nodo a uno de los cuatro perfiles resultantes puede ser representada cartográficamente, pudiéndose apreciar una clara zonificación del borde urbano (Figura 4) a partir de la cual se pueden distinguir patrones espaciales basados en la centralidad. En concreto, al analizar la distribución espacial de los perfiles se puede advertir lo siguiente: el Perfil 4 se localiza espacialmente en suelos con connotaciones eminentemente agrarias, no solo en cuanto a su morfología o parcelación, sino también a los usos aún predominantes en ellos; los Perfiles 2 y 3 se localizan espacialmente en tejidos claramente urbanos, en los que las actividades y su vigor funcional los enclavan en lo que podríamos llamar "ciudad consolidada"; por su parte, el Perfil 1 se sitúa en un espacio de transición y de transformación urbana reciente, aún en consolidación en la actualidad. Por otro lado, cabe destacar que existe una diferenciación espacial entre el Perfil 3 y el Perfil 2, marcándose el primero en el espacio urbano consolidado como aquellos fragmentos, generalmente ejes urbanos y calles, de la máxima relevancia, no solo a nivel de centralidad, sino también a nivel de vitalidad e intensidad urbana.

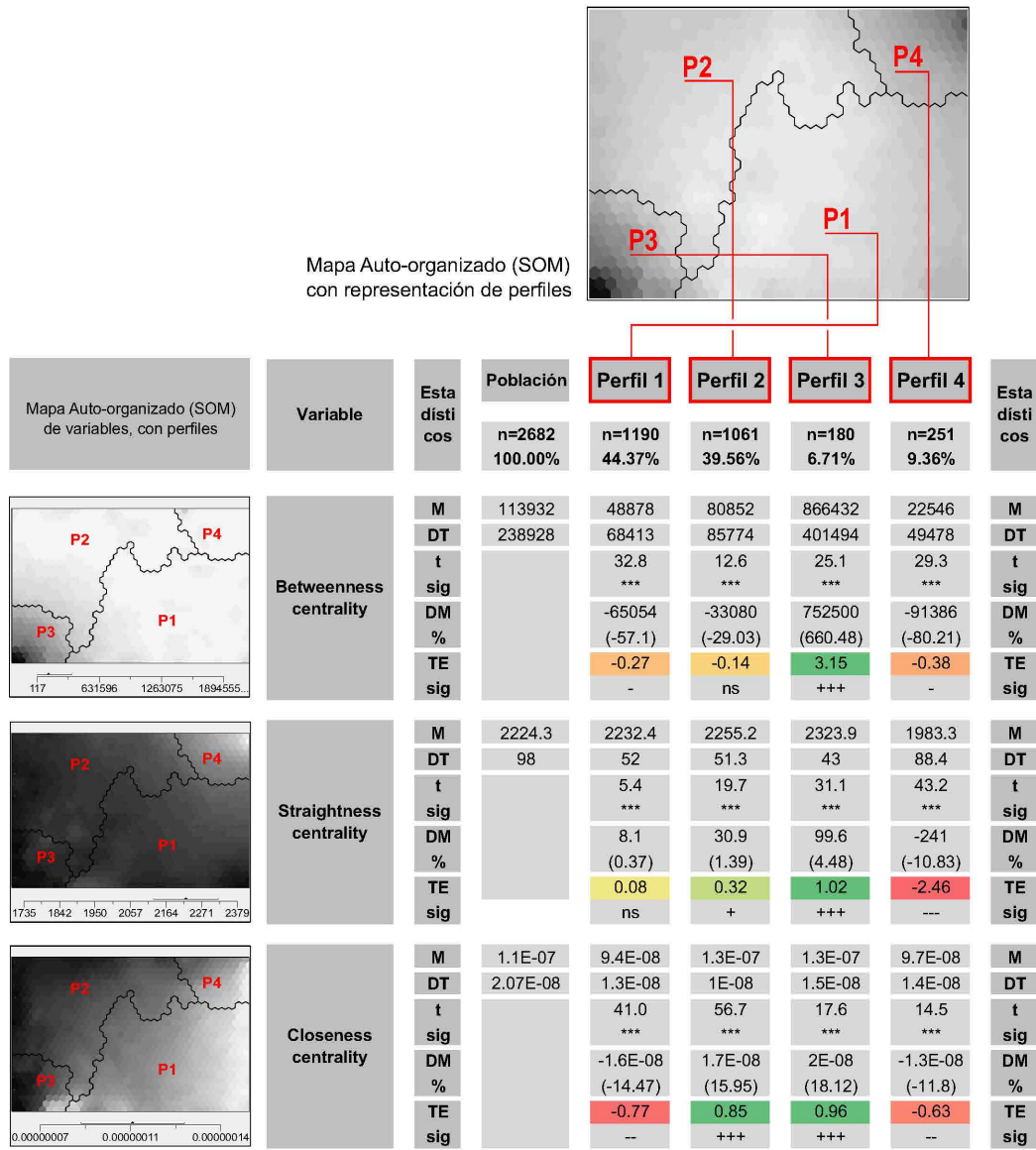
V. DISCUSIÓN

Aunque la consideración de la "centralidad del borde" podría estimarse, *a priori*, como contradictoria, no se puede obviar que, en un contexto de entendimiento de la necesaria continuidad urbano-rural y del borde como un espacio y no una línea, el enfoque de la centralidad de la red viaria mixta del borde es una aplicación innovadora que merece ser explorada, pudiendo arrojar interesantes resultados que contribuyan a la comprensión de este espacio. Por otra parte, y puesto que la centralidad

puede ser concebida desde diferentes perspectivas, existiendo por tanto diferentes indicadores para su análisis, parece también oportuno emplear algún método que permita la identificación de perfiles de centralidad que integren los resultados de las diferentes medidas. En este punto, el empleo de Mapas Auto-organizados, como ya se ha comentado en el apartado introductorio, plantea una serie de ventajas que los hacen especialmente interesantes. Se trata, pues, de una aplicación innovadora, ya que, si bien los Mapas Auto-organizados no son en sí mismos un método nuevo, sí lo es su aplicación a medidas de centralidad espacial.

Desde esta perspectiva, la aplicación de las herramientas anteriores al caso del borde urbano de la ciudad de Granada ha permitido obtener los resultados antes recogidos, los que se comentan y discuten a continuación.

Respecto a los mapas de centralidad obtenidos para el borde urbano de la ciudad de Granada en su contacto con la Vega, se debe indicar que estos permiten hacer una lectura nunca antes realizada de este espacio -a excepción del trabajo de Pérez-Campaña, Abarca-Álvarez y Talavera-García (2016)-, que sí muestra resultados de análisis de centralidad en relación con parcelas abandonadas y degradadas, pero que no integra dichos resultados en perfiles. Tal y como puede apreciarse en la Figura 2, la centralidad de proximidad muestra valores más elevados en las zonas urbanas más compactas, si bien es posible encontrar algunos nodos en la vega que presentan también valores elevados de centralidad de proximidad. Las centralidades de intermediación y de rectilinealidad muestran unos patrones más complejos. De hecho, es posible encontrar nodos de elevada centralidad en localizaciones muy variadas a lo largo de la red viaria mixta. Se puede distinguir también algunos ejes de centralidad (sobre todo, en el caso de la centralidad de intermediación) que conectan nodos centrales de la ciudad con la Vega, así como la parte central de la ciudad con la conurbación sur. Estos resultados revelan, en definitiva, la existencia de diferentes grados de centralidad dentro del borde urbano, donde además es posible identificar zonas o ejes característicos. Gracias a otros trabajos de aplicación de medidas de centralidad en entornos urbanos (véase los ya citados de Porta *et al.*, 2011; o Strano *et al.*, 2013, entre otros) sabemos que no todas las medidas tienen igual valor explicativo de la estructura urbana. En el caso aquí estudiado, los resultados de la centralidad de intermediación y de rectilinealidad revisten mayor interés, ya que en ellos se intuyen patrones más específicos de distribución de nodos (alineaciones, en cuanto a la centralidad de intermediación, y zonas de relativa homogeneidad, en cuanto a la centralidad de rectilinealidad). No obstante, cabe plantearse si el análisis multivariable conjunto mediante la integración de todos los valores de centralidad a nivel de cada nodo, podría ofrecer una información diferente o complementaria de la que se puedan derivar patrones espaciales del borde urbano. Es precisamente aquí donde realiza su contribución el Mapa Auto-organizado de los valores de centralidad.



LEYENDA

N = Tamaño de la población
 n= Tamaño de muestra
 M= Media
 DT= Desviación Típica
 t= Test de Student:

sig= Significación p-valor (ns: p>0.05)
 sig= Significación p-valor (*: p>0.05)
 sig= Significación p-valor (**: p>0.01)
 sig= Significación p-valor (***: p>0.001)

DM = Diferencia de medias

TE = Tamaño del efecto (d de Cohen)

sig= --- efecto negativo grande
 sig= -- efecto negativo medio
 sig= - efecto negativo bajo
 sig= ns: no significativo
 sig= + efecto positivo bajo
 sig= ++ efecto positivo medio
 sig= +++ efecto positivo alto

Figura 3. Mapa Auto-Organizado (SOM), Mapa SOM de Variables y Tabla de perfiles y estadísticos para cada una de las variables de centralidad estudiadas. Fuente: Elaboración de los autores.

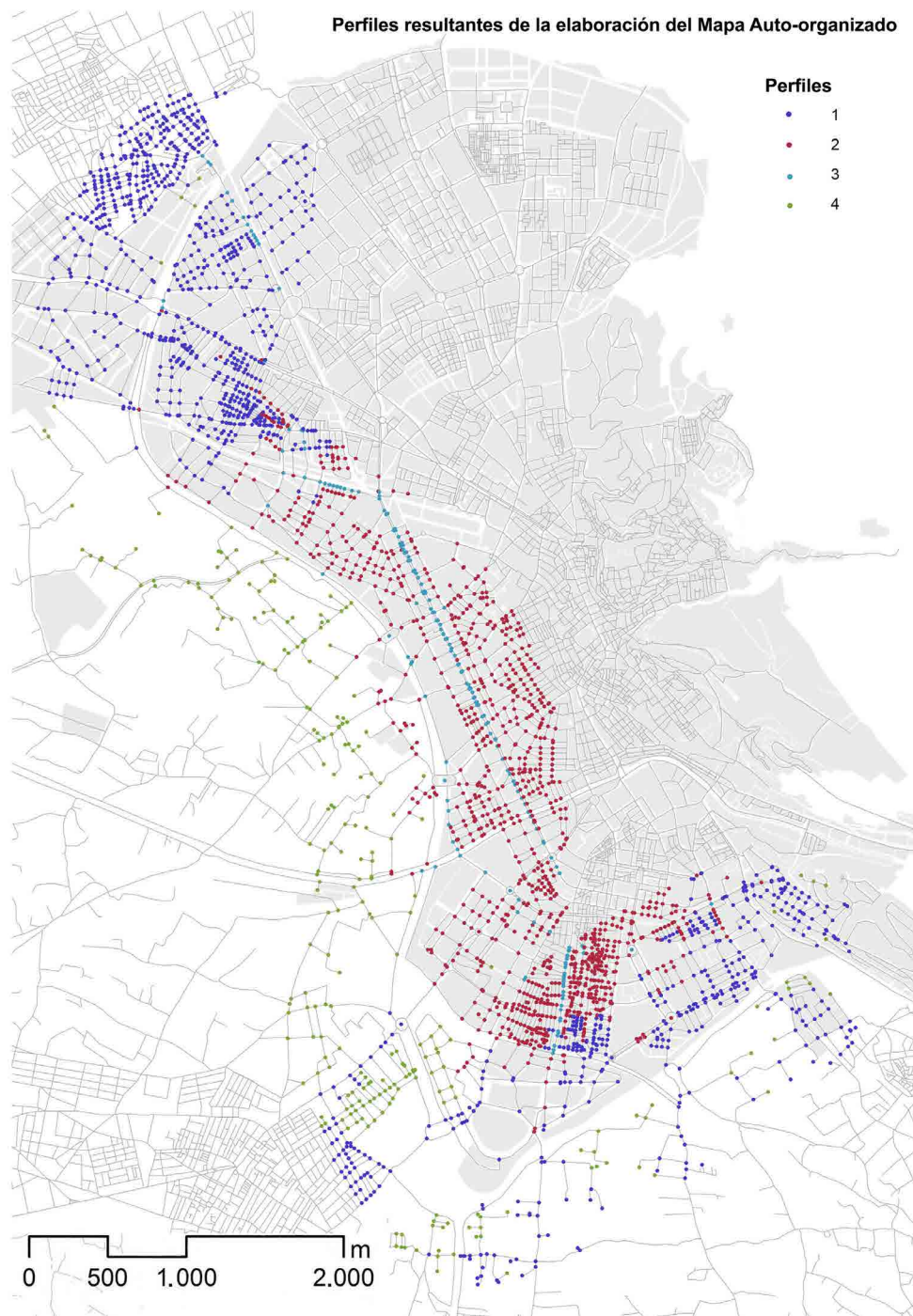


Figura 4. Representación espacial mediante GIS de los cuatro perfiles hallados mediante el Mapa Auto-organizado (SOM).
Fuente: Elaboración de los autores.

En efecto, al evaluar los resultados obtenidos de la identificación de cuatro perfiles a partir del Mapa Auto-organizado a través de un análisis estadístico (Figura 3), es posible llevar a cabo las siguientes apreciaciones.

i) Los perfiles hallados presentan una elevada significación estadística en todas las pruebas Test de Student efectuadas para comparar los valores alcanzados por cada variable de cada perfil en relación a la totalidad de los nodos en estudio.

ii) Al analizar, en la Figura 3, el TE del agrupamiento en perfiles sobre cada una de las variables, se desprende información muy relevante, especialmente cuando los efectos son altos (superiores en valor absoluto a 0.8). De este modo, se verifica una caracterización de los perfiles atendiendo a sus Tamaños de Efecto: el Perfil 2 (entorno nítidamente urbano) presenta un Tamaño de Efecto positivo alto en la variable *Closeness centrality*, con el resto de variables con Tamaños del Efecto bajos; el Perfil 3 (identificable con ámbitos de máximo vigor urbano) expresa Tamaños del Efecto altos en las variables, *Straightness*, *Closeness* y *Betweenness*, destacando en esta última por un TE extremadamente elevado; el Perfil 4 (cualidades rurales) despunta por Tamaños del Efecto negativo de grado medio en las variables *Betweenness* y *Closeness* y un TE negativo alto (extremadamente alto) en la variable *Straightness*.

iii) Al visualizar los perfiles de centralidad en el espacio mediante GIS (Figura 4), se identifica patrones espaciales que manifiestan gran coherencia y se reconoce perfectamente tejidos urbanos espacialmente coherentes e interpretables como ámbitos espaciales con las mismas características urbano-rurales. Complementando lo evidenciado en el apartado "Resultados", se puede notar que a partir del análisis SOM basado en análisis espacial de la Centralidad emergen patrones espaciales asociados a identidades enormemente complejas, como son las áreas nítidamente urbanas (Perfil 2), y dentro de ellas, espacios urbanos de extrema urbanidad y centralidad, propias de las estructuras urbanas, normalmente calles de la máxima vitalidad y relevancia para la ciudad, como pueden ser los ejes de Camino de Ronda o de Avenida de Dílar, notoriamente estructurantes tanto en la movilidad y la funcionalidad, como en la urbanidad y vitalidad de la ciudad de Granada (Perfil 3). Por último, también se distingue entornos de transición ciudad-campo, propios de los espacios en transformación de las ciudades (Perfil 1), así como espacios de carácter rural (Perfil 4).

iv) Se ha comprobado que el modelo alcanzado mediante la red neuronal artificial con la que se ha identificado y caracterizando perfiles de nodos de viario a partir del estudio de cuatro variables de centralidad, presenta gran solidez.

Por lo anteriormente descrito, es posible concluir que se ha verificado la hipótesis de partida, comprobándose que la metodología propuesta es útil para la caracterización de la centralidad de los entornos de transición de lo urbano y lo rural,

pues ha permitido en el caso de estudio, identificar con claridad tejidos eminentemente urbanos y diferenciarlos de los que son claramente rurales, siendo capaz de mostrar, asimismo, los ámbitos de transición.

Respecto a los usuarios potenciales de la metodología y de sus resultados, conviene detenerse en dos aspectos principales. El primero de ellos es la utilidad que puede tener la metodología para contribuir al estudio y entendimiento de los patrones espaciales de los bordes urbanos. El segundo, es el derivado del hecho de que se está trabajando con la cuestión de la centralidad, con todas las connotaciones estratégicas que esta idea tiene al respecto de, por ejemplo, la ubicación de equipamientos, la zonificación de crecimientos, la intervención sobre el viario, la movilidad, etc. La metodología expuesta podría ejercer utilidad de forma operativa en diversas áreas, como por ejemplo: la identificación temprana de procesos de transformación y urbanización en áreas rurales; el reconocimiento y la delimitación ciudad-transición-campo en áreas en transformación; la protección espacial; la detección de áreas de la máxima vitalidad urbana, o la identificación y evaluación de la intensidad de los procesos de *urban sprawl* en el territorio (cuestión que habría que validar, verificando su aplicabilidad en diferentes contextos territoriales).

En suma, la metodología propuesta posee un gran potencial de replicabilidad en otros ámbitos, lo que se vuelve especialmente interesante con vistas a la realización de estudios comparados y de cara al refuerzo de la validación de la metodología.

VI. CONCLUSIONES

El empleo de Mapas Auto-organizados aplicados a los resultados de tres medidas de centralidad espacial (*Betweenness*, *Straightness* y *Closeness*) y calculados sobre la red viaria-mixta del borde urbano de Granada, ha permitido eficazmente obtener perfiles que logran identificar y diferenciar espacios de diversa naturaleza en el borde urbano, que se describen en seguida:

-Perfil 1: Se trata de un perfil correspondiente a un patrón espacial de espacios en transformación, localizados sobre todo en las zonas en proceso de conurbación de la ciudad de Granada.

-Perfil 2: Es un perfil que revela un patrón espacial nítidamente urbano, propio de la parte de ciudad más consolidada presente en el borde urbano, seleccionado como ámbito de estudio.

-Perfil 3: Este muestra un patrón espacial característico, propio de entornos de máximo vigor urbano desde el punto de vista de su consolidación y de su capacidad estructurante.

-Perfil 4: Se corresponde con un patrón espacial propio de espacios rurales, en este caso, de carácter agrario periurbano, que típicamente define la Vega de Granada.

Respecto a la validación de la metodología para el caso de estudio específico de la periferia de la ciudad de Granada, se ha advertido la robustez del método propuesto, observable en cuanto que la espacialización de los patrones generados mediante el Mapa Auto-organizado presenta una coherencia total en el territorio, correspondiéndose con los distintos tipos de suelo, sus transiciones y sus distintos tipos de centralidad y vitalidad urbana.

Asimismo, los resultados obtenidos revisten un triple interés. Por una parte, ofrecen un análisis novedoso en el contexto del propio ámbito de estudio. Por otra, aplican medidas de centralidad en una red viaria mixta correspondiente a un borde urbano y formada por segmentos de calles, viario metropolitano y caminos agrarios, lo que supone una aplicación innovadora de análisis de centralidad, que suelen realizarse, casi de manera exclusiva, en redes de calles, puramente urbanas. Por último, el empleo de Mapas Auto-organizados es también novedoso ya que da pie a una integración y posterior representación de los valores de centralidad para mostrar la existencia de varios perfiles que pueden asociarse a patrones espaciales específicos.

Para concluir, es importante señalar que el enfoque planteado en este artículo abre numerosas vías posibles de indagación, las que pasan por explorar, incluso, más allá de los bordes urbanos, lo cual permitiría corroborar las bondades del método. Efectivamente, resultaría de gran interés su adaptación y aplicación a espacios de naturaleza agrícola o forestal, en los que aún existen nichos de investigación en relación a su caracterización morfológica.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABARCA-ÁLVAREZ, Francisco Javier y FERNÁNDEZ-AVIDAD, Ángel. Generation of downtown planning-ordinances using self organizing maps. *10th International Conference on Design and Decision Support Systems, DDSS 2010*. S.l.: s.n., pp. 63-79, 2010.

AGRYZKOV, Taras; TORTOSA, Leandro y VICENT, José F. New highlights and a new centrality measure based on the Adapted PageRank Algorithm for urban networks. *Applied Mathematics and Computation* [en línea], 2016, vol. 291, pp. 14-29. [Consultado 13 julio 2017]. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.amc.2016.06.036>

ANTROP, Marc. Why landscape of the past are important for the future. *Landscape and Urban Planning* [en línea], 2005, vol. 70, nº 1, pp. 21-34. [Consultado 21 septiembre 2017]. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2003.10.002>

ANVIDA, Analysis and Data Visualization in Net. [Consultado 8 junio 2016]. Disponible en: www.anvida.es

BRANDES, Ulrik; ROBINS, Garry; MCCRANIE, Ann y WASSERMAN, Stanley. What is network science? *Network Science*, 2013, vol. 1, nº 1, pp. 1-15. [Consultado 8 junio 2016]. DOI: <http://dx.doi.org/10.1017/nws.2013.2>

CHOAY, Françoise. *Pour une anthropologie de l'espace*. Éditions du Seuil, 2006.

CHRISTALLER, Walter. *Central Places in Southern Germany*. New Jersey: Prentice Hall, 1966.

CLÉMENT, Gilles. *Manifiesto Del Tercer Paisaje*. Barcelona: Gustavo Gili, 2007.

COHEN, Jacob. *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*. S.l.: Lawrence Erlbaum Associates, Publishers, 1998.

CORBOZ, André. El territorio como palimpsesto. En: Martín Ramos, Ángel, *Lo urbano en 20 autores contemporáneos*, Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya, 2004, pp. 25-34.

DEMATTEIS, Giuseppe. En la encrucijada de la territorialidad urbana. En: MARTÍN RAMOS, Ángel, *Lo urbano en 20 autores contemporáneos*, Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya, 2004, pp. 171-176.

DIAPPI, Lidia; BOLCHIM, Paola y BUSCEMA, Massimo. Improved Understanding of Urban Sprawl Using Neural Networks. En: J.P. VAN-LEEUWEN y H.J.P. TIMMERMANS (eds.), *Recent Advances in Design and Decision Support Systems in Architecture and Urban Planning*. Politecn Milan, Dept Architecture and Planning, I-20133 Milan, Italy: Springer, 2004, pp. 33-49.

DUANY, Andres y PLATER-ZYBERK, Elisabeth. *SmartCode 9.2*. The Town Paper Publisher, 2003.

GEDDES, Patrick. *Ciudades en evolución*. Oviedo: KrK, 2009.

HAGGET, Peter y RICHARD, Chorley. *Network analysis in Geography*. London: Edward Arnold, 1972.

HAMAINA, Rachid; LEDUC, Thomas y MOREAU, Guillaume. Towards Urban Fabrics Characterization based on Buildings Footprints. En: J. Gensel; D. Josselin y D. Vandenbroucke (eds.), *Bridging the Geographic Information Sciences. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography* [en línea]. Berlin: Springer, pp. 327-346, 2012. [Consultado 15 agosto 2017]. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-29063-3_18

JIANG, Bin. A topological pattern of urban street networks: universality and peculiarity. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2007, vol. 384, nº 2, pp. 647-655. [Consultado 23 agosto 2017]. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.physa.2007.05.064>

KASKI, Samuel y KÖHONEN, Teuvo. Exploratory Data Analysis by the Self-Organizing Map: Structures of Welfare and Poverty In the World. *Neural Networks in Financial Engineering. Proceedings of the Third International Conference on Neural Networks in the Capital Markets*, 1996, pp. 498-507.

KÖHONEN, Teuvo. Self-organized formation of topologically correct feature maps. *Biological Cybernetics* [en línea], 1982, vol. 43, nº 1, pp. 59-69. [Consultado 23 agosto 2017]. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00337288>

KÖHONEN, Teuvo. *Self-Organizing Maps* [en línea]. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1995. [Consultado 23 agosto 2017]. Disponible en: <http://www.springer.com/cn/book/9783642976100>.

KÖHONEN, Teuvo. Self-organizing semantic maps. *Biological cybernetics*, 1989, vol. 61, nº 4, pp. 241-254.

KRAFTA, Rómulo. Fundamentos del análisis de centralidad espacial urbana. *Centro-h*, 2008, nº 2, pp. 52-72.

LÄMMER, Stefan; GEHLEN, Björn y HELBING, Dirk. Scaling laws in the spatial structure of urban road networks. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* [en línea], 2006, vol. 363, pp. 89-95. [Consultado 15 agosto 2017]. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.physa.2006.01.051>

LATORA, Vito y MARCHIORI, Massimo. A measure of centrality based on network efficiency. *New Journal of Physics* [en línea], 2007, vol. 9, pp. 1-12. [Consultado 15 agosto 2017]. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1367-2630/9/6/188>

LIU, Yaolin; WANG, Huimin; JIAO, Limin; LIU, Yanfang; HE, Jianhua y AI, Tinghua. Road centrality and landscape spatial patterns in Wuhan Metropolitan Area, China. *Chinese Geographical* [en línea], 2015, vol. 25, nº 4, pp. 511-522. [Consultado 15 agosto 2017]. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11769-015-0749-y>

MASUCCI, A. Paolo; SMITH, Duncan; CROOKS, Andrew y BATTY, Michael. Random planar graphs and the London street network. *European Physical Journal B* [en línea], 2009, nº 71, pp. 259-271 [Consultado 15 agosto 2017]. DOI: <http://dx.doi.org/10.1140/epjb/e2009-00290-4>

PÉREZ-CAMPAÑA, Rocío; ABARCA-ÁLVAREZ, Francisco Javier y TALAVERA-GARCÍA, Rubén. Centralities in the city border: a method to identify urban-rural interventions. *Ri-Vista*, 2016, 2, pp.38-53.

PORTA, Sergio y LATORA, Vito. Multiple centrality assessment: mapping centrality in networks of urban spaces. En: THWAITES, Kevin; PORTA, Sergio; ROMICE, Ombretta y GREAVES, Mark (eds.), *Urban Sustainability through environmental design: approaches to time-people-place responsive urban spaces*. New York: Routledge, 2007, pp. 102-109.

PORTA, Sergio; CRUCITTI, Paolo y LATORA, Vito. The network analysis of urban streets: A primal approach. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2006, vol. 33, nº 5, pp. 705-725.

PORTA, Sergio; CRUCITTI, Paolo y LATORA, Vito. Multiple centrality assessment in Parma: a network analysis of paths and open spaces. *Urban Design International* [en línea], 2008, vol. 13, nº1, pp. 41-50. [Consultado 12 julio 2017]. DOI: <http://dx.doi.org/10.1057/udi.2008.1>

PORTA, Sergio; LATORA, Vito; WANG, Fahui; RUEDA, Salvador; STRANO, Emanuele; SCELLATO, Salvatore; CARDILLO, Alessio; BELLÍ, Eugenio; CÁRDENAS, Francisco; CORMENZANA, Berta y LATORA, Laura. Street centrality and the location of economic activities in Barcelona. *Urban Studies*, 2011, vol. 49, nº 7, pp. 1471-1488.

RAVETZ, Joe; FERTNER, Christian y NIELSEN, Thomas Sick. The Dynamics of Peri-Urbanization. En: NILSSON, Kjell; PAULEIT, Stephan; BELL, Simon; AALBERS, Carmen, y NIELSEN, Thomas A. (eds.), *Peri-Urban futures: Scenarios and Models for Land Use Change in Europe*. New York: Springer, 2013, pp. 13-44.

SEVTSUK, Andres y MEKONNEN, Michael. Urban network analysis. A new toolbox for ArcGIS. *Revue internationale de géomatique*, 2012a, vol. 22, nº 2, pp. 287-305.

SEVTSUK, Andres y MEKONNEN, Michael. *Urban Network Analysis. A toolbox for ArcGIS 10/10.1*. Help Document. City Form Lab. Singapore University of Technology & Design in collaboration with MIT, 2012b.

SKUPIN, André y AGARWAL, Pragya. Introduction: What is a Self-Organizing Map? En: P. AGARWAL y A. SKUPIN (eds.), *Self-organising maps: applications in geographic information science*. West Sussex: Wiley, 2008, pp. 1-20.

SPIELMAN, Seth E. y THILL, Jean-Claude. Social area analysis, data mining, and GIS. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2008, vol. 32, nº 2, pp. 110-122.

STRANO, Emanuele; VIANA, Matheus; COSTA, Luciano; CARDILLO, Alessio; PORTA, Sergio y LATORA, Vito. Urban Street networks, a comparative analysis of ten European cities. *Environment and Planning B: Planning and Design* [en línea], 2013, nº 40, pp. 1071-1086. [Consultado 12 julio 2017]. DOI: <http://dx.doi.org/10.1068/b38216>

TAKATSUKA, Masahiro. An application of the Self-Organizing Map and interactive 3-D visualization to geospatial data. En: *Proceedings of the 6th International Conference on GeoComputation*, 2001, pp. 24-26.

TRILLO SAN JOSÉ, Carmen. *Agua y paisaje en Granada. Una herencia de al-Andalus*. Granada: Diputación de Granada. Los libros de la Estrella /17, 2003. WASSERSTEIN, Ronald L. y LAZAR, Nicole A. The ASA's statement on p-values: context, process, and purpose. *The American Statistician* [en línea], 2016, vol. 70, nº 2, pp. 129-130. [Consultado 12 agosto 2017]. DOI: <https://doi.org/10.1080/00031305.2016.1154108>

WEISS, Sholom M. y INDURKHYA, Nitin. *Predictive Data Mining: A Practical Guide*. Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1998.

WU, Pao Kuan y HSIAO, Tsung Chi. Factor Knowledge Mining Using the Techniques of AI Neural Networks and Self-Organizing Map. *International Journal of Distributed Sensor Networks* [en línea], 2015, vol. 11, nº 10. [Consultado 12 agosto 2017]. DOI: 10.1155/2015/412418.

ZHANG, Jingyuan; SHI, Hao y ZHANG, Yanchun. Self-organizing map methodology and google maps services for geographical epidemiology mapping. *DICTA 2009 - Digital Image Computing: Techniques and Applications* [en línea], 2009, pp. 229-235. [Consultado 12 agosto 2017]. DOI: 10.1109/DICTA.2009.46.