

Fundamentos del análisis de centralidad espacial urbana¹

Fundamentals for the analysis of urban centralities

Rômulo Krafta²

Fecha de recepción: julio de 2008

Fecha de aprobación y versión final: noviembre de 2008

Resumen

Este artículo procura exponer las bases de análisis espacial para la centralidad urbana. Para eso conceptualiza la centralidad como una dimensión de jerarquía de la forma urbana y, a partir de ello, desenvuelve diferentes maneras de explicarla. En primer lugar, procura reunir medios descriptivos, adecuados para capturar los componentes y relaciones existentes en la forma urbana, fundamentalmente, como componentes, las unidades de espacio abierto y de formas construidas, como relaciones de proximidad y de distancia, y su síntesis en gráficos urbanos. A continuación, demuestra una obtención de medidas básicas de centralidad, basadas en la distancia relativa– accesibilidad y posición relativa– centralidad por interposición. Diversas medidas de accesibilidad –topológica, geométrica, gravitacional, así como centralidad por interposición– escolaridad, centralidad Freeman– Krafta, modelos industriales, son demostradas. Varias de estas medidas son aplicadas en caso de estudio de la Región Metropolitana de Porto Alegre, un conglomerado de más de veinte ciudades y cuatro millones y medio de habitantes en el extremo sur del Brasil. Esta región metropolitana fue representada por un sistema de aproximadamente treinta y cinco mil unidades espaciales, cada una representando una intersección vial al borde o una extremidad de vía pública existentes. El sistema fue así cargado con una distribución espacial de su población, de sus puestos de trabajo y de sus cargas escolares. Finalmente, el artículo especula sobre los roles que la centralidad espacial urbana podría desempeñar en la dinámica espacial urbana, desde la hipótesis de someterla a un solo uso, determinado por la posición de los factores atractivos hasta la de operar como un factor de desequilibrio que conduzca al cambio.

Palabras clave: análisis espacial, configuración urbana, sistemas urbanos, modelos urbanos.

Abstract

This paper's aim is to explore the fundamentals of urban centrality spatial analysis. It assumes that centrality is a dimension of urban form hierarchy and tries to develop different ways to explain it. First, it gathers the proper descriptive means to capture the elements and relationships of the urban form, the open space and built form units, as components, and adjacency as well as distance as relationships, both expressed by a graph. Second, the basic centrality measures are brought forward, those based on relative distance –accessibility– and those based on relative position –betweenness centrality–. Several forms of accessibility –topologic, geometric, gravitational, as well as betweenness centrality– choice, Freeman-Krafta centrality, factorial centrality, are described. Several of those measures are applied to a case-study on Porto Alegre's Metropolitan Region that encompasses more than twenty cities and four and a half million inhabitants of Southern Brazil. The Porto Alegre Metropolitan Region is represented by a thirty five thousand node graph, each node standing for an existing single corner or a road end of the area. The system was loaded with spatially distributed population, jobs and school places. Finally, the paper speculates on the role of spatial centrality in urban dynamics, exploring hypothesis from direct land use determination, when attractors would follow the already established spatial centrality, to the opposite, when centrality is taken as an expression of system's disequilibrium which drives the system to change.

Keywords: spatial analysis, urban configuration, urban systems, urban models.

1 Traducción del portugués a español por Nelma Martins.

2 Programa de Posgrado en Planificación Urbana y Regional, Universidad Federal do Rio Grande do Sul. Correo electrónico: krafta@ufrgs.br

Introducción

El fenómeno de centralidad urbana ha sido tratado, desde el inicio de la ciencia regional, de dos formas básicas: como “supuesto” a partir del cual otros aspectos del proceso urbano y regional se vuelven tratables, o como “consecuencia” de un proceso socio-espacial, y así un punto de tratamiento analítico por sí mismo. Von Thünen (1826-1990) inaugura en su clásico “estado aislado” la primera idea, considerando un punto en el centro de un territorio, donde las transacciones entre productores y consumidores están concentradas. A partir de esto, la ocupación productiva del suelo agrícola se organiza en función de costos de transporte. La adopción de este propósito parece responder a la intuición y a la inducción empírica, ya que puede fácilmente ser observado en cualquier lugar. La estabilidad del sistema de Von Thünen fue obtenida, en primer lugar, por el aislamiento, y en segundo, por la negligencia al crecimiento vegetativo y a la innovación. Christaller (1966), aún en el ámbito regional, sugiere que la estabilidad de un sistema regional podría ocurrir sin aislamiento, condición en que un conjunto de centros urbanos de diferentes escalas sustituye al centro único. La estabilidad sería alcanzada por la jerarquía espacial de los centros, suponiendo que funciones de servicios tendrían umbrales de alcance diferentes y naturalmente se distribuirían según una yuxtaposición de áreas de cobertura de un mismo servicio, combinada con una superposición de áreas de cobertura de diferentes servicios, los cuales refuerzan centros preexistentes.

Estudios intraurbanos igualmente presuponen la existencia de un centro, como Alonso (1964) y Wingo (1961), cuyos *central business districts* concentran el empleo, el consumo y organizan la distribución del uso del suelo residencial a su alrededor. Tal cual el modelo conceptual de Von Thünen, en que se reflejan, estos contemplan un sistema estable que admite apenas cambios cuantitativos.

Estudios más recientes (Allen, 1997; Fujita y Mori, 1997) sugieren que el crecimiento vegetativo, innovación y migración son factores relevantes en la dinámica regional y urbana, y que precisamente estos factores son decisivos para la emergencia de un sistema de centros. Ambos estudios sugieren una formación de centralidad urbana y regional inestable, sujeta a cambios cualitativos causados por fuerzas de concentración y de dispersión actuando simultáneamente sobre el sistema espacial. Estos estudios pueden ser considerados parte de aquellos que entienden la centralidad como resultado de un proceso, cuya dinámica aún no está suficientemente explicada. Sus hipótesis son: primero existirían ventajas en producir y consumir concentradamente, pero la concentración genera “deseconomías” que, a largo plazo, corroen la centralidad provocando dispersión y, según qué innovaciones redefinan el sistema, provocando nuevas centralidades.

Otros estudios, que ven la centralidad como un resultado, buscan explorar su especialidad. Hansen, en 1959, ya sugería que la accesibilidad sería un factor relevante en la formación de centralidad. Su estudio *How accessibility shapes land use* demuestra que centralidad urbana puede ocurrir a partir de ventajas de locación comparativas. Mejor accesibilidad confiere a algunos lugares mayor visibilidad, mayor exposición a un conjunto de consumidores y los convierte en preferenciales para la localización de actividades que justamente dependen de estos factores. La competencia por estas localizaciones crea una estructura de valores del suelo, selección de actividades y, luego, diferenciación socio-espacial. Hillier (1993) repite esta misma tesis al sugerir la existencia de un patrón de movimiento natural debido únicamente a la configuración espacial del sistema de espacios públicos urbanos. Esta configuración comprobaría a cada espacio una jerarquía dentro del sistema, en función de su accesibilidad (o integración, según su terminología). Esta accesibilidad relativa definiría un patrón de movimiento de personas, en que la jerarquía espacial y densidad de movimiento tendrían

correspondencia. El patrón de movimiento natural induciría a la localización de los puntos de atracción urbanos –puntos de provisión de servicios y puestos de trabajos– de forma convergente, resultando de allí una coincidencia entre configuración espacial y distribución de puntos de atracción. Así, configuración informa a la localización de actividades, que refuerza la jerarquía espacial.

Krafta (1994 y 1999) y Polidori y Krafta (2004) entienden la centralidad como una manifestación de desequilibrio espacial que conduce al cambio. Así, centralidad, vista como una distribución desigual de “materia urbana” sobre el territorio, generaría, a cada momento, un potencial de desarrollo correspondiente e inverso a esta distribución, según el cual localizaciones urbanas de baja centralidad alcanzarían algún potencial de desarrollo y viceversa. Por este camino, cada nuevo incremento de “materia urbana”, al alterar la distribución de la centralidad, redefine los potenciales relativos de cada localización en el sistema. Por otro lado, el crecimiento (expansión del sistema espacial en los bordes del sistema) eleva la centralidad de las localizaciones más internas y antiguas, confiriendo inercia al centro histórico. Aparentemente contraria a Hillier, esta teoría vincula la formación de centralidad a la probabilidad de desarrollo de lugares menos centrales del sistema, concediendo, sin embargo, algún peso al centro histórico.

Como se puede notar, los estudios que toman a la centralidad como un fenómeno de emergencia son justamente aquellos que consideran la flecha del tiempo, esto es, un proceso evolutivo e histórico, fundando sus sistemas en variables económicas y espaciales. En general, se entiende que la centralidad forma parte de la dinámica socio-espacial urbana y es en sí un proceso en constante modificación y depende de factores espaciales, como sociales. Este artículo tiene su enfoque en la cuestión espacial, específicamente en los problemas relativos a la descripción y mensuración de los estados de la centralidad, como paso indispensable para la representación de su proceso.

Dimensiones espaciales de la centralidad

Lefebvre (1970) se refiere a la centralidad como una propiedad esencial de los sistemas urbanos, pero de la cual la materialidad es al mismo tiempo trivial y elusivo: acúmulo de materia urbana en ciertos lugares, conexiones entre lugares, correspondencia entre lugares y prácticas sociales. La distribución desigual de la materia urbana sobre el territorio, así como las conexiones selectivas existentes entre los lugares de esos depósitos, configuran una jerarquía espacial cuya complejidad ciertamente supera aquella de las diferencias morfológicas visibles. Cualquier tentativa de describir con precisión esa jerarquía presupone la superación de dos barreras: descripciones que consigan ir más allá de la trivial clasificación tipológica, así como que fijen y condensen las características no visibles de la centralidad. El análisis espacial, de configuración o configuracional como también es nombrado, busca hacer eso, apostando por la representación sistemática del espacio urbano.

El sistema espacial urbano puede ser entendido, preliminarmente, como un conjunto de unidades espaciales discretas vinculadas entre sí por relaciones lo suficientemente fuertes como para transmitir al todo cualquier transformación local. Componentes y relaciones constituyen el sistema urbano.

Componentes y relaciones espaciales

La descomposición del espacio de las ciudades en unidades discretas puede ser obtenida por componentes geométricos elementales: puntos, líneas y áreas. La división del espacio en áreas resulta en una matriz de polígonos yuxtapuestos, cada uno aportando tanta irregularidad como deriva de la aplicación de uno o más criterios de repartición del territorio. Los criterios más comunes son homogeneidad y continuidad, que pueden conducir a una matriz de figuras diversificadas cuanto al área, perímetro y forma. Mapas de zonas tradicionalmente usados en planeamiento urbano físico, así como mapas convexos, son ejemplos de

descripciones según polígonos irregulares. A pesar de la variada morfología de las ciudades, sugerir matrices muy variadas de las regulares es, paradójicamente, lo más utilizado. La creciente disponibilidad de fotografías orbitales, junto con la tecnología de procesamiento de imágenes ha privilegiado el uso de matrices celulares cuadradas. La nueva generación de modelos de simulación urbana, basados en la dinámica

autómata celular, igualmente contribuye al uso diseminado de matrices celulares regulares usualmente cuadradas.

Alternativamente se adopta una división en líneas, usándose para eso el sistema vial urbano y regional. Diversos criterios de individualización de líneas han sido usados, desde una definición más o menos simple de *rua*, pasando por definiciones más precisas como *líneas axiales* –extensiones rectilíneas de vías, “trechos”–, porciones de vías limitadas por dos intersecciones consecutivas, o una extremidad y una intersección. Además, hay la posibilidad de realizar una representación por puntos, caso en el que la definición más obvia para “punto” es la intersección de dos o más vías, así como una extremidad de vía pública.

Queda claro que líneas y puntos son expresiones reducidas de áreas urbanas, igualmente que los puntos, líneas y polígonos de aquí en adelante denominados *células* son expresiones reducidas de partes de ciudad, dotadas de una variedad de contenidos que incluyen, más allá del área territorial, la forma construida, las actividades, los significados, los valores, los símbolos, entre otros.

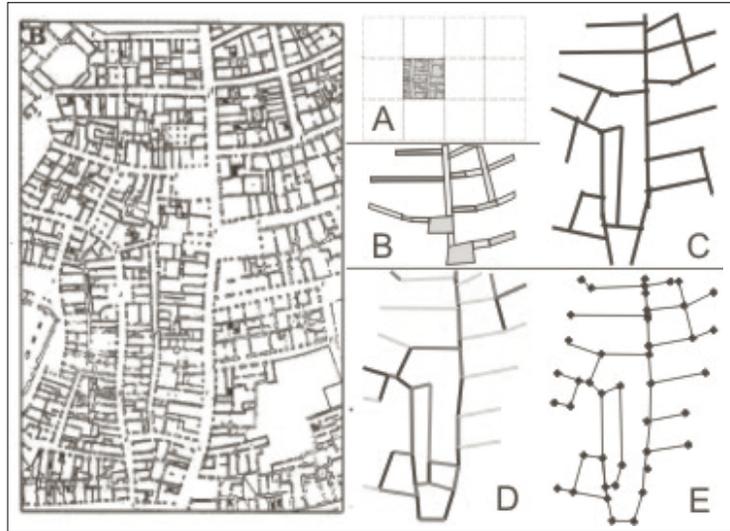


Figura 1: Fragmento de tejido urbano y diversas descomposiciones en unidades espaciales: a) matriz regular; b) matriz adaptada convexa; c) mapa de ejes; d) mapa de tramos; e) mapa de nudos

Fuente: Elaboración propia.

Hay dos relaciones espaciales posibles entre células: yuxtaposición y adyacencia. Yuxtaposición ocurre cuando dos células comparten por lo menos un punto de sus perímetros (en el caso de polígonos), o son consecutivos (en el caso de líneas y puntos); adyacencia ocurre cuando hay continuidad física entre ellas, como es el caso de dos calles que se cruzan, o dos esquinas consecutivas conectadas por un tramo de calle. Generalmente se asume que los sistemas espaciales son alcanzables, lo que quiere decir que todas sus células mantienen por lo menos una adyacencia y es posible alcanzar cualquiera de las dos a partir de cualquier otra.

Contenidos y relaciones cognitivas

Una tercera relación posible entre células ocurre como consecuencia de algún tipo de complementariedad entre sus contenidos, como son los casos de la célula que contiene un punto de oferta de servicio y las células que poseen usuarios de aquel servicio, o las células que no contienen estaciones de una misma línea de transporte público. Son relaciones remotas, ya que no se limitan a un vecindario inmediato. En general, las relaciones remotas más utilizadas en el análisis espacial son las

de complementariedad funcional, como los ejemplos anteriores. Sin embargo, otras relaciones pueden ser establecidas por los usuarios, a partir de la posición, información y estructura cognitiva de cada uno. De esta forma, se puede suponer la existencia de una jerarquía urbana para cada usuario. A partir de una realidad objetiva, sería posible derivar n órdenes simbólicas, correspondientes a n usuarios, bien como una imagen pública compuesta por los elementos más compartidos de estas ordenes simbólicas particulares.

Componentes, relaciones y evolución

Los cambios ocurren por la acción de los agentes sociales, como se espera, que desarrollan estrategias de uso y transformación de la ciudad. Tales estrategias pueden ser en general descritas como autómatas, especulativas o subjetivas. Por estrategia automática se entiende la situación en que, como señala Hillier, agentes leen correctamente la jerarquía espacial dada por el sistema vial y posicionan las edificaciones y actividades de acuerdo con ella, ubicando los puntos de atracción en las vías más accesibles y residencias en las de menos acceso. Por estrategia especulativa (Krafta, 1994) se entiende una situación en que promotores inmobiliarios, proveedores de servicios y residentes, buscando maximizar las utilidades y ganancias, juegan y corren riesgos. Promotores inmobiliarios producen edificaciones en locales diferentes de las más accesibles, con la expectativa de agregar ganancias adicionales, y así condicionan la localización de los demás agentes. Residentes, limitados por la oferta, escogen según sus necesidades y perspectivas de valoración inmobiliaria. Proveedores de servicios aislados compiten entre sí por las localizaciones disponibles, anticipando tendencias. Grandes proveedores de servicios definen sus localizaciones independientemente, generando innovaciones. Por estrategia subjetiva se entiende la situación en que agentes son guiados por sus mapas cognitivos particulares (Portugali, 1996). Eso significaría combinar aspectos objetivos (autómatas o especulativos), y subjetivos (valores y símbolos individuales).

Esas tres estratégicas genéricas no son necesariamente excluyentes. Para una convergencia entre ellas, basta suponer que la estructura espacial urbana sea fuerte o suficiente para limitar la variación de las órdenes simbólicas individuales, esclavizándolas a una base objetiva común y que el componente especulativo sea también limitado. Es conocido que el factor especulativo disminuye en situaciones de estancamiento o crecimiento urbano y económico bajos. Los mapas cognitivos pueden convergir para una base común dominante cuando la ciudad posee una identidad suficientemente fuerte, una buena legibilidad. La importancia de eso para la centralidad urbana es evidente, en la medida en que los que prevalecen conducirían a situaciones de concentración (automata), descentralización (especulativa) y posiblemente dispersión (subjetiva) espacial, respectivamente.

Medidas de centralidad

Una vez definidos los componentes de la centralidad como porciones de espacios ocupando posiciones relativas, conexiones selectivas entre sí y aún contenidos diversos, se vuelve posible desarrollar formas de medirla, y para eso hay diferentes maneras.

Medidas simples con base en distancia relativa

Conocidas en el campo de la geografía por el nombre de accesibilidad, buscan identificar la centralidad de una célula perteneciente a un sistema espacial a través de la sumatoria de las distancias entre sí y las demás células. El procedimiento de medición consiste en considerar, a partir de cada célula, todos los caminos mínimos existentes a todas las demás células. La suma de sus distancias constituye el índice de accesibilidad de la célula en cuestión. Tal como ocurre con unidades espaciales, hay diferentes criterios para medir la distancia entre ellas: por topología, distancias geométricas simples, distancia ponderada, tiempo gastado en el recorrido, costo, o medidas compuestas. La distancia topológica entre dos células cualquiera i con j puede ser medida contando el número de células visitadas, por

el camino mínimo desde i hasta j , de tal forma que en el caso de dos células adyacentes la distancia es 1 (uno), de dos células separadas por una tercera la distancia es 2 (dos), y así sucesivamente. Las medidas sintácticas de *integración*, también conocidas como *asimetría relativa*, son calculadas de esta forma, considerando, en el caso de Hillier (1985) líneas axiales, y en el caso de Batty (2004) nudos o intercesiones, constituyendo así la forma más elemental de calcular centralidad.

Las distancias geométricas pueden ser polares (medidas en línea recta) y rectangulares (medidas por el sistema vial) (Ingram, 1971), igualmente medidas en términos de distancia, tiempo o costo consumidos en el recorrido. Considerando que toda célula perteneciente a un sistema espacial tiene un índice de accesibilidad particular, es posible comparar los índices de todas las células de un mismo sistema, estableciendo un *ranking*. También es posible, tomando los debidos cuidados, comparar los índices de accesibilidad de células pertenecientes a sistemas espaciales diferentes.

Medidas simples con base en posición relativa

Las medidas de centralidad basadas en posición relativa derivan del trabajo de Freeman (1977), que las desarrolla a partir del principio de que una célula k es central para un par de células ij , si está interpuesta en su camino mínimo. Freeman, investigando redes sociales, construyó un sistema topológico, empezando por considerar las conexiones directas entre dos individuos cualquiera, de manera simétrica y sin centralidad. Conexiones indirectas, o sea, las que dependen de un tercero, cuarto, etc., individuos para realizarse, desarrollan centralidad. Considerando un sistema de individuos, la centralidad es obtenida, primero, verificando cuáles individuos promueven la conexión entre cada par de otros, y segundo, sumando el número total de veces que cada individuo aparece interpuesto en los caminos mínimos entre todos los pares posibles. Hillier (1987) adoptó este procedimiento para el análisis espacial, considerando un sistema de líneas axiales interconectadas y computando

una medida de escoja (la denominación utilizada por él para esa medida es *choice*) usando el procedimiento desarrollado por Freeman.

Medidas compuestas de centralidad

Las distancias geométricas pueden aún ser relativizadas según un factor de decaimiento no lineal, como sugiere Ingram (1971), de forma que pequeñas diferencias en las distancias resultan en accesibilidades diferenciales proporcionalmente menores; mayores distancias implican accesibilidades proporcionalmente menores; y grandes distancias resultan en inaccesibilidades. Medidas temporales o económicas pueden ser utilizadas para medir distancias; en el primer caso, la medida geométrica es sustituida por el tiempo gastado en el recorrido, considerando un medio de transporte; en el segundo se utiliza una medida de costo, que puede ser exclusivamente monetaria (el valor de la tarifa) incluye factores de comodidad, elección modal, entre otros.

Todas las medidas de accesibilidad citadas consideran porciones de espacio y conectividades, contemplando diferentes desagregaciones espaciales y diferentes grados de elaboración en la medida de distancia, pero ignoran los contenidos de esas unidades espaciales. Echenique (1969) sugiere que aunque siempre sea posible medir la distancia entre dos puntos en el espacio, no siempre esa distancia tiene significado, ya que esos puntos pueden no mantener cualquier tipo de interacción. La noción de interacción espacial permite suponer un tipo de medida de accesibilidad en que los contenidos de las células son llevados en cuenta. En esta situación, la accesibilidad relativa de dos puntos será tanto mayor cuanto mayor fuera la real interacción entre ellos, y así se puede acrecentar la medida, una ponderación de magnitud y tipo de contenidos (actividades, *stocks*, entre otros.).

En Krafta (1994) hay un registro de desarrollo de la medida original de centralidad de Freeman para la aplicación en análisis espacial urbana, introduciendo las nociones de tensión y distancias. Por tensión se entiende la relación entre i y j expresada por el producto de sus contenidos; por distancia

se entiende la extensión del camino mínimo entre cada par de células, considerando que a la medida que esta aumenta, disminuye la centralidad de cada célula interpuesta en ese camino. A través de estos principios se obtiene que un par de células genera una tensión:

$$T(ij) = A(i) \times A(j)$$

Y esta es distribuida en parcelas iguales entre todas las células interpuestas en su camino:

$$C(k)ij = T(ij) / n$$

En las fórmulas, T es la tensión del par ij , A es el atributo de i con j , C es la centralidad de la célula k debido al par ij y n es la cantidad de células que componen el camino mínimo entre i con j . Se ve que la inclusión de los principios de tensión y de distancia aproxima la medida de centralidad, por imposición, a la noción general de gravedad, cuando los atributos de las células equivalen a las masas y la distancia es análoga a la suya, homónima en la expresión universal de gravitación. En situaciones en que una cantidad pequeña de células constituye el camino mínimo entre un par de células, la centralidad atribuida a cada una es relativamente mayor que si ese camino es compuesto por una gran cantidad de células interpuestas. Igualmente, la centralidad será tanto mayor cuanto mayor sea la tensión desarrollada por el par en cuestión.

Medidas factoriales de centralidad

Desarrollando la noción de interacción espacial implícita en los sistemas espaciales urbanos, Krafta (1996) propone tres nuevas medidas factoriales de centralidad: polarización, convergencia y oportunidad espacial. Todas ellas consideran, al contrario de las anteriormente expuestas, una selectividad en la consideración de los pares de células. Esa selectividad ocurre justamente a través de la observación de los papeles que los contenidos de las células pueden desempeñar en la formación de la centralidad urbana real.

Polarización es una medida factorial de centralidad que considera apenas los pares de células complementarias, o sea, residencia y servicio. Todos los pares residencia y servicio son ignorados. El cálculo es hecho por el procedimiento Freeman- Krafta descrito antes. Oportunidad espacial puede ser definida como una medida de privilegio de locación residencial, frente a un sistema de servicios. Se asume el sistema urbano polarizado por una cantidad de puntos de ofertas de un determinado servicio, en cantidades y localizaciones irregulares, contrapuesto a una distribución igualmente irregular de localizaciones residenciales, las cuales tienen acceso diferenciado a este servicio.

La medida de oportunidad espacial considera pares orientados, donde los orígenes son las localizaciones residenciales y los destinos son los puntos de oferta de servicio. La tensión compuesta entre cada par es dada por el valor del servicio (cantidad, tipo); la medida de oportunidad es, obviamente, atribuida apenas la localización residencial y sin depender de la cantidad de residentes en las existentes.

La medida de convergencia puede ser definida como el privilegio de ubicación de puntos de oferta de un determinado servicio, en función de la distribución de los consumidores potenciales y de los demás puntos de oferta de ese servicio. Su cálculo considera igualmente pares orientados con origen en el servicio y destino en las residencias, considera con tensión entre cada par el producto del servicio (cantidad, complejidad, tipo) por la residencia (cantidad de consumidores potenciales), el resultado puede ser leído como la probable repartición de los consumidores entre los diversos puntos de oferta, teniendo como base la variable espacio.

Grafos urbanos

Aunque conceptualmente simples, las medidas de centralidad demandan cálculos en volumen de manera que son imposibles de ser procesadas manualmente. El procesamiento computacional es realizado a partir de un grafo urbano. Grafo es una entidad matemática compuesta de nudos y líneas, representando respectivamente entidades y relaciones. Un

grafo urbano posee nudos representando células y líneas representando conexiones entre ellas. Algoritmos computacionales fueron desarrollados para investigar grafos y encontrar caminos mínimos entre cualquier par de nudos. Con eso es posible calcular medidas de centralidad en sistemas urbanos compuestos de una gran cantidad de unidades espaciales.

Siempre que la representación del espacio es realizada a través de entidades mono o bidimensionales (polígonos o líneas), su expresión en los respectivos grafos serán reducciones nodales de esas figuras (*centroïdes*); cuando esa representación es nodal (cuando la unidad espacial es una intersección o extremidad), el grafo coincide con el mapa. Esta última presenta la ventaja de permitir una visualización inteligible a partir del propio grafo, al no demandar, de esta manera, procedimientos de transposición de datos numéricos, derivados del procesamiento del grafo, para el mapa y su visualización.

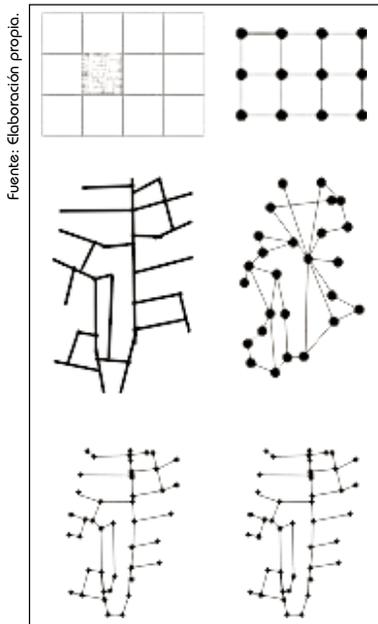


Figura 2: Tres matrices de unidades espaciales (izq.) y sus respectivos grafos (der.)



Figura 3: Un fragmento de tejido urbano (sup.), la identificación de una unidad espacial y sus unidades adyacentes (inf. izq.) y su respectivo grafo (inf. der.) con identificación de espacios públicos y edificaciones

Grafos urbanos para la representación de medidas complejas de centralidad podrán incluir nudos para representación del espacio público y del espacio construido, como son los casos de las medidas de centralidad ponderada, oportunidad espacial y convergencia.

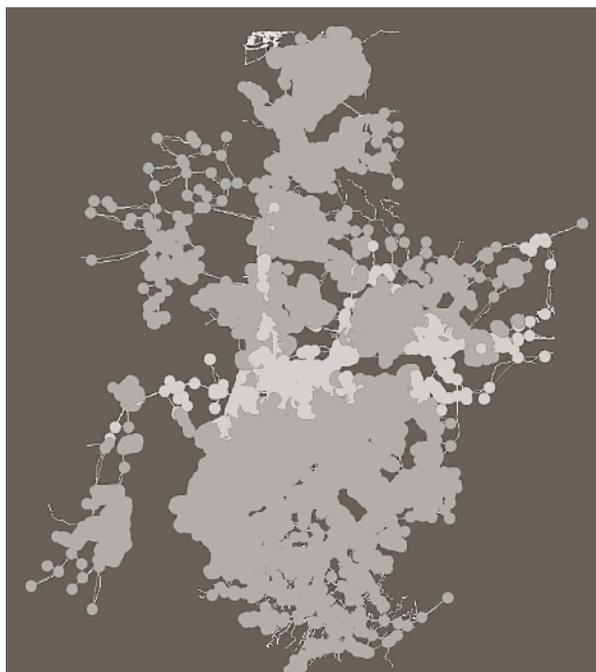
Aplicaciones de medidas de centralidad en la Región Metropolitana de Porto Alegre

Porto Alegre es la principal ciudad de una región metropolitana de aproximadamente cuatro millones de habitantes, localizada en el extremo sur del Brasil. Su formación urbana está asociada a la función de capital del Estado de Río Grande del Sur y sus vinculaciones con la región y el resto del país. De esos vínculos, la que conduce al Norte (carretera BR 116) ha sido el principal eje de desarrollo metropolitano, abarcando las principales aglomeraciones de la región. Recientemente, el eje Este-Oeste ha ganado importancia. Con la intención de realizar algunos estudios exploratorios, utilizamos su base espacial, asociada a informaciones socioeconómicas actualizadas



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4: Base espacial del experimento y que indica los municipios (polígonos coloridos) y nudos que representan intersecciones y extremidades del sistema vial. En detalle, el centro histórico de Porto Alegre



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5: Configuración de la accesibilidad de la Región Metropolitana de Porto Alegre. Los nudos destacados (en rojo) constituyen el 1% de los más accesibles del sistema de aproximadamente 34 mil nudos

disponibles. La RMPA está legalmente compuesta por 31 municipios; sin embargo, 10 de ellos constituyen la principal estructura de la región, estableciendo el gran eje Norte-Sur a lo largo de la BR 116 y la variante Este, a lo largo de la BR 290. A esos 10 municipios (Porto Alegre, Alvorada, Viamão, Cachoeirinha, Gravataí, Canoas, Esteio, Sapucaia do Sul, San Leopoldo y Novo Hamburgo) fueron añadidos tres (Guaíba, Eldorado do Sul y Nova Santa Rita), que constituyen el área de estudio del tren metropolitano y cuentan con información detallada y actualizada. La región está representada espacialmente por aproximadamente 34 mil nudos, cada uno registrando una intersección o extremidad de vía pública. Los atributos de cada nudo están registrados según la población, renta media, número de puestos de trabajo y número de matrículas escolares.

Las primeras medidas de centralidad tomadas son las que tienen base en distancia relativa (accesibilidad), en posición relativa planar (centralidad simple), y en posición relativa ponderada (centralidad ponderada). Para esta última, la ponderación fue hecha por la inclusión de atributos de población y puestos de trabajos asociados a cada nudo del sistema espacial. La figura 5 indica la medida de accesibilidad representada gráficamente por el mapa de nudos del sistema metropolitano, y la figura 6 los dibujos de los valores obtenidos para las medidas de centralidad calculadas por el método Freeman-Krafta, con y sin cargamentos. En el

gráfico se nota la influencia de la distribución irregular de la población y de los empleos, lo que hace el dibujo de la medida de centralidad ponderada divergir de la planar, pero también se nota el poder estabilizador que la base espacial posee en sí misma, ya que la jerarquía general convergente es observada en las dos medidas. En el mapa se ve el poder de síntesis espacial que las dos carreteras N-S y E-O poseen, al contener la mayoría de los nudos más accesibles del sistema. Muchos de esos nudos son los que aparecen como más centrales en las medidas expresadas por el gráfico, como se puede ver en el mapa de la figura 7.

Dos diferencias importantes pueden ser observadas si lo comparamos con el mapa de accesibilidad en la figura 5: a) en el eje N-S emerge como el más importante, al contrario de lo que ocurre en la figura 5, donde el más importante es E-O; b) un sin número de nudos pertenecientes al área central de Porto Alegre, densamente edificados y ocupados comercialmente, aparecen como más centrales. El conjunto de 350 nudos centrales fueron representados en tres colores, donde los rojos son más centrales, seguidos de los anaranjados y de los azules.

En seguida fue producida una medida de centralidad con rayo limitado. Ese tipo de medida impone un limitador a la consideración de pares de nudos de una red, y tiene como efecto develar un tipo de centralidad más local. En términos generales, se puede imaginar medir centralidad de una red con rayo uno (1), caso en que cada nudo tendría su centralidad explicada solamente

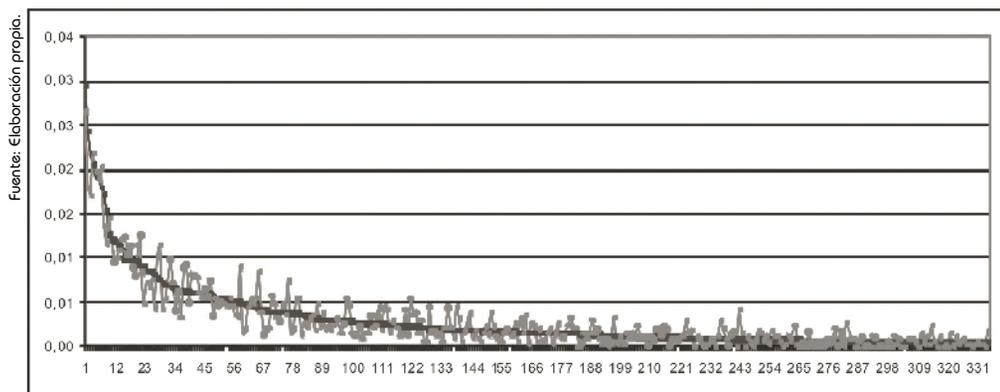
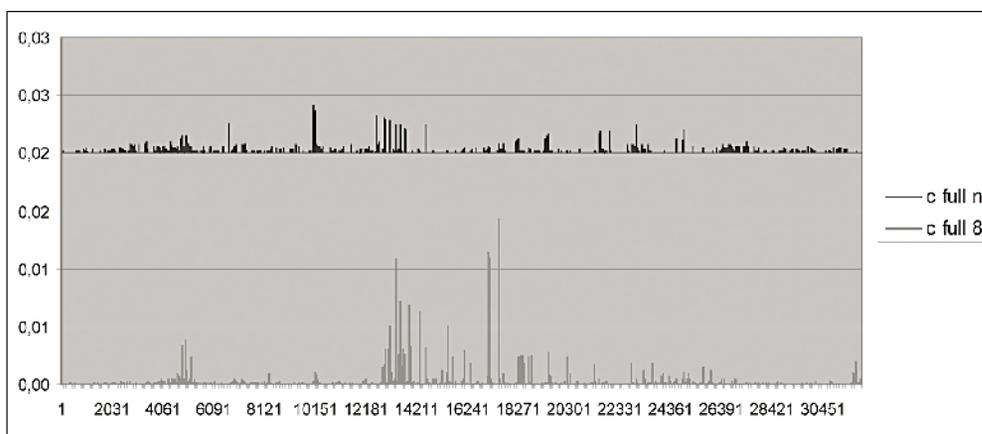


Figura 6: Dibujo comparativo de las medidas de centralidad calculada por el método Freeman-Krafta con y sin cargamentos. La línea más regular (café oscuro) representa el gradiente de centralidad planar y la línea irregular (café claro) muestra la medida de centralidad obtenida con población y puestos de trabajo



Fuente: Elaboración propia.

Figura 7: Medida de centralidad ponderada, calculada por el método Freeman-Krafta, que indica el conjunto de 0,5% de nudos más centrales del sistema



Fuente: Elaboración propia.

Figura 8: Dibujo de medida de centralidad con rayo de ocho pasos (gráfico superior), comparada con medida de centralidad global (gráfico inferior)

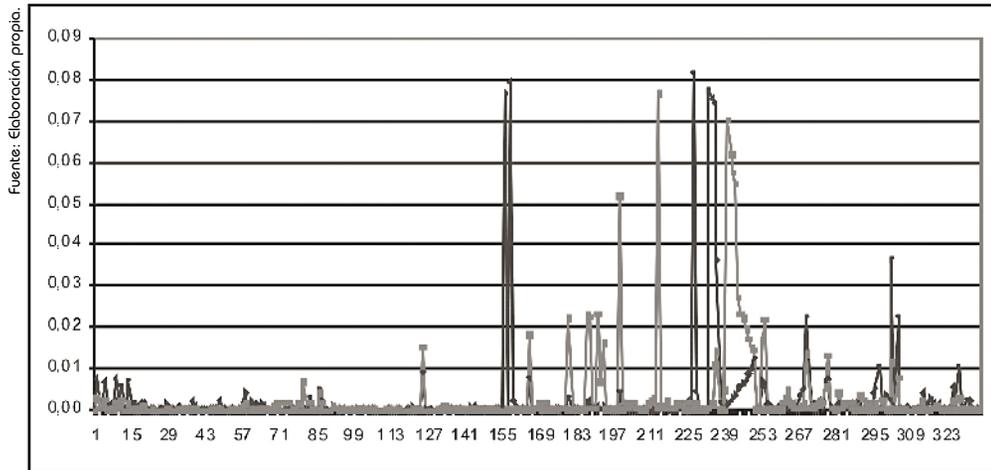


Figura 9: Centralidad de la Región Metropolitana tomada a partir de sus puntos extremos norte y sur

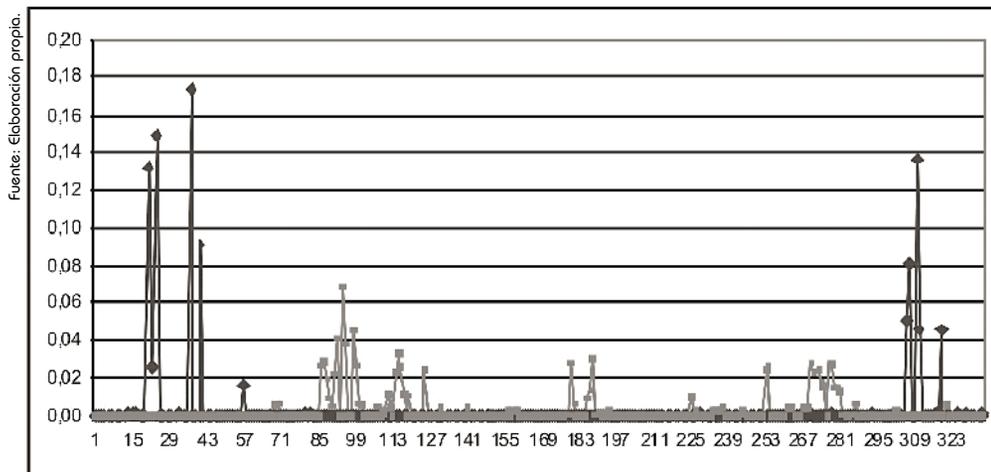
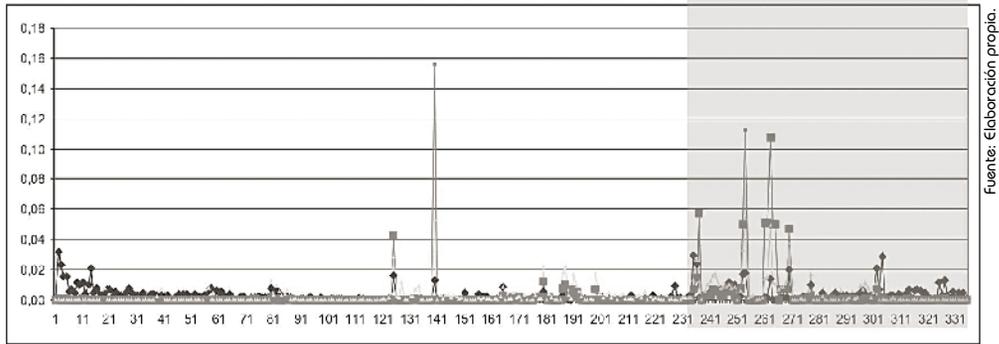


Figura 10: Dibujo de centralidades tomadas para poblaciones de más alta y más baja renta de la ciudad de Porto Alegre. La línea que alcanza los valores más altos del gráfico representa la alta renta

por su vecindario directo, o sea, en función de su adyacencia a otros nodos. En la medida en que el rayo aumenta, crece el vecindario de cada nodo, considerado en el cálculo de su centralidad, dando la oportunidad justamente a la identificación de nodos locales más importantes. En esa circunstancia, equipamientos relevantes de la Región Metropolitana aparecen como nuevos centros locales. En la figura 8 se compara un dibujo de medida de centralidad con rayo máximo con otra de rayo ocho (universo comprendido en una distancia topológica de ocho pasos), donde se puede observar, en la línea superior, diversos centros que no coinciden con los centros globales ubicados en el mapa en la línea inferior.

Finalmente, para ejemplificar la utilización de medidas de centralidad en que los atributos simbólicos son utilizados en vez de los tradicionales atributos funcionales, se presentan algunos experimentos de representación de la llamada orden simbólica urbana. En el primero, figura 9, los dibujos corresponden a representaciones de la Región Metropolitana a partir de sus extremos Norte y Sur. Para esto fue considerada la totalidad de los servicios localizados en el sistema y las poblaciones respectivas de las zonas urbanas localizadas en las extremidades Norte y Sur de la Región Metropolitana. Como se puede observar, las diferencias son muy grandes,



Fuente: Elaboración propia.

Figura 11: Dibujo de medidas de centralidad tomadas respectivamente con un marcador en el nudo 141, y cargamento de comercio y servicios en toda la Región Metropolitana (curva café oscuro). Además atributos simbólicos asignados en los nudos viales principales (curva café claro) y atributos de empleos industriales (línea café más clara)

cada extremo “mira” la región de forma diferente. Otro factor relevante es la alta centralidad que determinados tramos viales adquieren (nudos numerados de 235 en adelante, en el extremo derecho del gráfico), los mismos que no poseen cualquier atributo además de su posición relativa en el sistema.

Sigue un dibujo de centralidades tomadas a partir de las áreas de más alta y más baja renta. En la primera se considera solamente la población de más alta renta y los puntos de oferta de servicios correspondientes, en la segunda se lleva en cuenta la población de renta más baja y sus respectivos servicios. Las diferencias de jerarquía surgen nuevamente; es digno de comentario el hecho de nudos viales (extremo a la derecha del gráfico) y áreas más centrales de la ciudad (extremo a la izquierda del gráfico) son notadamente más importantes para la población de alta renta que para los de baja, figura 10.

A continuación, tres medidas de centralidad tomadas con diferentes atributos: la primera considera un marcador en un nudo próximo del extremo Este de la Región y todos los puntos de oferta de comercio y servicios de la RM; la segunda añade atributos a los principales nudos viales. Esos atributos, tanto marcador cuanto los de servicio y de orientación atribuidos a los nudos viales, pueden ser asumidos como de naturaleza cognitiva, o anclas de orientación. La tercera adiciona a los anteriormente referidos, los puntos de oferta de empleos industriales. En el gráfico 11 se puede ver que:

- El nudo 141, señalado como referencia de las medidas, aparece con importancia creciente en la medida en que referencias de orientación son adicionadas al sistema.
- La curva relativa a la primera medida (línea azul) muestra que el centro histórico de Porto Alegre, sede de la RM, es la principal referencia de orientación desde el punto de vista de los servicios. Igualmente importantes son algunos nudos viales (puntos en el área señalada en el extremo derecho del gráfico).
- La curva relativa a la segunda medida (línea roja), que considera atributos de orientación en los nudos viales sugiere que a la medida en que esos puntos ganan contenido simbólico, pasan a controlar todo el sistema.
- La curva relativa a la tercera medida (línea amarilla), que considera más los atributos de localización industrial, redistribuye valores relativos de jerarquía sin cambiar la estructura.

Finalmente, se obtiene una comparación entre dos medidas, esta vez manteniendo los atributos (marcador en el nudo 141 y cargamentos de comercio y servicios en toda la RM), pero utilizando procedimientos de medidas diferentes, figura 12. En la primera fue usada la centralidad, como en general ha sido utilizada con grafo no direccional. Esa direccionalidad fue establecida en función del nudo que contenía el marcador como origen y los nudos que contenían oferta de servicios como destino. Se nota un desplazamiento de

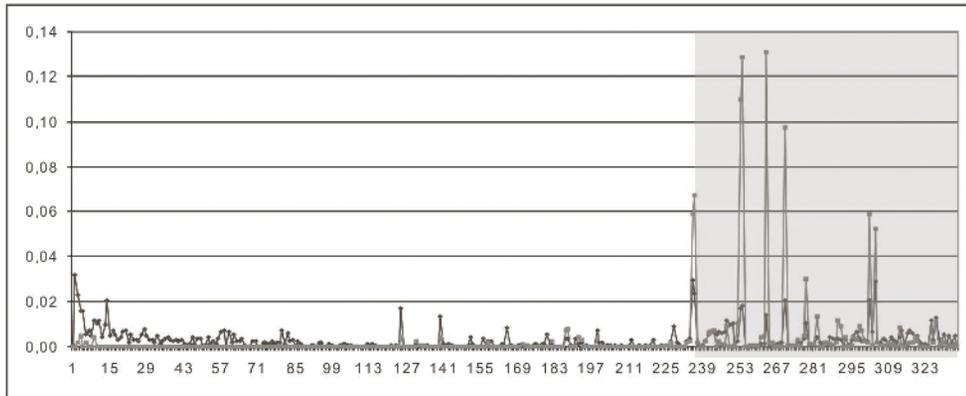


Figura 12: Comparación de dos medidas de centralidad usando grafos direccionales (línea café oscuro) y direccionales (línea café claro), donde se ve un desplazamiento de la jerarquía para el sistema vial metropolitano en la segunda medida

la jerarquía que, en la medida de centralidad (línea azul) equilibra nudos que ofertan servicios (extremo izquierdo del gráfico) con nudos viales (extrema derecha); la medida de polaridad confiere mayor importancia a los nudos viales metropolitanos.

Comentarios finales

La centralidad ha sido crecientemente usada en análisis espacial como medio para enseñar la estructura interna de diferentes tipos de redes. Habiendo sido instrumento de la geografía física al principio, el análisis de redes capturó la atención de muchos otros científicos, ya que se muestra capaz de representar sintéticamente muchos fenómenos tanto del mundo natural como del social. Desde el trabajo inicial de Hagget y Chorley (1972), el análisis de redes ha crecido continuamente, como confirman los estudios de Rosvall y Sneppen (2006) sobre redes sociales, Buhl y otros (2006), Porta y otros (2004) sobre redes espaciales intraurbanas, Portugali (2004) sobre cognición y dinámica espaciales, Minnhagen y otros (2004) sobre redes aleatorias, y aún Mark Newman, Albert Lazlo Varabais y Duncan Watts (2006) sobre estructura y dinámica de redes libres de escala.

Muchos de esos estudios han utilizado algún tipo de medida de centralidad para proceder al análisis estructural. Centralidad es una medida de jerarquía que puede, alternativamente, estar enfocada en la importancia de ciertos nudos en

el sistema, o en la distribución de valores de centralidad. En el primer caso, la red es observada como un sistema asimétrico en el cual ciertos nudos (personas, lugares, etc.) detienen la jerarquía superior, y así papeles diferenciales. En el segundo caso, la centralidad es vista como un recurso del sistema, como información, riqueza, etc., distribuido irregularmente entre sus miembros.

Hay diferentes maneras de calcular centralidad de redes. Crucitti y otros (2006) sugieren que las principales son aquellas que tienen base en conectividad, proximidad, *entremeamiento*, dirección e información. Centralidad por conectividad sería la forma más simple, basada apenas en la suposición que los nudos más centrales son aquellos que detienen el mayor número de conexiones con otros nudos del sistema. Centralidad por proximidad es el caso de distancia relativa entre los nudos del sistema, asumiendo que los nudos más centrales son aquellos cuya suma de las distancias, desde sí a todos los demás nudos del sistema, es mínima. Centralidad por *entremeamiento* asume que los nudos más centrales son los que más veces aparecen en los caminos mínimos entre todos los pares de nudos del sistema. Centralidad por dirección asume que la eficiencia de comunicación entre cualquier par de nudos del sistema es el inverso de la longitud de su camino mínimo. Finalmente, centralidad por información es relativa a la capacidad de reacción del sistema a la supresión de un nudo.

Siendo representado comúnmente por nudos y líneas, como un grafo, las redes espaciales en general consideran nudos como localizaciones y líneas como distancias, cuando diferentes atributos pueden ser consignados tanto a nudos como a líneas. La red espacial más simple es aquella en que nudos representan porciones de espacio (zonas, líneas axiales, tramos, esquinas, etc.) y líneas son adyacencias o distancias. Redes más elaboradas pueden considerar ponderaciones tanto para nudos como para líneas, cargando los primeros con cantidades de usos del suelo, actividades, residentes, o puestos de trabajos, y las últimas con distancias métricas, tiempos de viaje, costos de desplazamiento, etc. Redes espaciales ponderadas han sido extremadamente útiles para explorar sistemas urbanos, como Ingram (1971), Krafta (1994, 1997) y Crucitti (2005), entre otros, sugieren. En adición a esos trabajos, este artículo sugiere nuevas formas de definir y categorizar variables de centralidad, así como relacionar medidas resultantes de ellas con la dinámica espacial. Respecto al primero, están las técnicas relacionadas para representar y mensurar la orden simbólica; en cuanto al segundo, las diferentes teorías que pretenden proyectar los efectos espaciales de la centralidad en el tiempo y con eso explicar la dinámica urbana.

El estado del arte en el análisis de redes urbanas incluye las relaciones entre redes escalares, propias de los sistemas espaciales y redes libres de escala, del tipo *small-world* (Watts, 2006). La expresión *small-world* se refiere a ciertos tipos de redes que concilian características de localidad (redes altamente conectadas internamente, pero aisladas) y globalidad (una única red totalmente conectada). Siendo físicas espaciales, las redes urbanas constituyen, al principio, redes globales conectadas; sin embargo, estudios de centralidad evolutiva (Krafta y Fattori, 2005), y particularmente los de orden simbólica, sugieren que subyacente a la red física existirían configuraciones más abstractas semejantes a las redes tipo *small-world*. Varios de esos estudios de centralidad urbana más recientes han sido desarrollados por investigadores de otras áreas, como física e informática, lo que demuestra el interés que los sistemas urbanos pueden despertar, así como sugieren que nuevos avances en la explicación del fenómeno urbano pueden estar en camino. **h**

Bibliografía

- Allen, P. (1997). *Cities and regions as self-organizing system*. Amsterdam: Gordon & Breach Science Publishers.
- Alonso, W. (1964). *Location and land use*. Cambridge: Harvard University Press.
- Batty, M. (2004). *A new theory on Space Syntax*. Londres: Centre for Advanced Spatial Analysis working paper. University College London.
- Buhl, J.; Gautrais, J., N. Reeves y otros (2006). "Topological patterns of street networks of self-organized urban settlements", en: *The european physical journal B.*, volumen 49, número 4
- Christaller, W. (1966). *Central places in southern Germany*. Prentice Hall.
- Crucitti, P.; Latora, Vito y S. Porta (2006). "Centrality measures in urban networks", documento electrónico. Disponible en: <http://arXiv:physics/0504163v1>
- Echenique, M. y otros (1969). "A spatial model of urban stock and activity", en: *Regional Studies*, volumen 3, número 3, pp. 281-312.
- Freeman, L.C. (1977). "A set of measures of centrality based on betweenness", en: *Sociometry*. Volumen 40, número 1, pp. 35-41.
- Fujita, M. y T. Mori (1997) "Structural stability and evolution of urban systems", en: *Regional Science and Urban Economics*, volumen 27, número 4, pp. 399-442.
- Hagget, P. y R. Chorley (1972). *Network analysis in Geography*. Londres: Edward Arnold.
- Haken, H. y J. Portugali (1996). "Synergetics, inter-representation networks and cognitive maps", en: Portugali, J. (Ed.) *The construction of cognitive maps*. Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Hansen, W. G. (1959). "How accessibility shapes land use", en: *Journal of American Planning Association*, 25, pp. 73-76.
- Hillier, B. y otros (1987). "Creating life: or does architecture determine anything?", en: *Architecture and behavior*, número 3, pp. 233-250.

- Hillier, B. y otros (1993). "Natural movement, or configuration and attraction in urban pedestrian movement", en: *Environment & Planning B*, 20(1), pp. 29-66.
- Hillier, B. (1985). *The social logic of space*. Cambridge: University Press.
- Ingram, D. R. (1971). "The concept of accessibility, a search for an operational form", en: *Regional Studies*, volumen 5, número 2, pp. 101-107.
- Krafta, Rômulo (1994). "Modelling intra-urban configurational development", en: *Environment & Planning B: Planning and Design*, volumen 21(1), pp. 67-82.
- Krafta, Rômulo (1996). "Urban convergence: morphology and attraction", en: *Environment & Planning*, volumen 23(1), pp. 37-48.
- Krafta, Rômulo (1999). "Spatial self-organization and the production of the city", en: *Urbana*, volumen 24, pp. 49-62.
- Krafta, Rômulo; Fattori, R. y otros. (2005). "Syntactic Evolution of Cities, V International Symposium on Space Syntax", en: Van Nes, Akkelies. *Delft 2005. Space Syntax 5th International Symposium*. Amsterdam: Techne Press.
- Lefebvre, H. (1970). *La revolution urbaine*. París: Galimard.
- Minhagen, P.; M. Rosvall, K. Sneppen (2004). "Self-organization of structures and networks from merging and small scale fluctuations". Disponible en: *arXiv: cond-mat 0406752*
- Newman, Mark; Barabasi, Albert y Duncan J. Watts (Eds.) (2006). *The structure and dynamics of networks*. Princeton: Princeton University Press.
- Polidori, M. y R. Krafta (2005). *Simulando crescimento urbano com integração de fatores naturais, urbanos e institucionais*. Geofocus.
- Porta, S.; Crucitti, P. y V. Latora (2004). *The network analysis of urban streets: the dual approach*. Disponible en: *arXiv: Cond-mat 0411241*
- Portugali, J. (1996). *The construction of cognitive maps*. Dordrecht: Kluwer.
- Portugali, J. (2004). "Toward a cognitive approach to urban dynamics", en: *Environment and Planning B: Planning and Design*, volumen 31(4), pp. 589-613.
- Rosvall, M. y K. Sneppen (2006). "Modelling self-organization of communication and topology in social networks". Disponible en: *arXiv: Physics*
- Von Thunen, J. P. (1990)[1826]. *Der isolierte Staat in Beziehung auf Landwirtschaft und Nationalökonomie*. Berlín: Verlag.
- Watts, D. J. (2006). "Collective dynamics of small-world networks", en: Newton, M. y otros (Ed.) *The structure and dynamics of networks*. Princeton: Princeton University Press.
- Wingo, L. (1961). *Transportation and urban land*. Baltimore: John Hopkins University Press.