

# Morfogénesis de la ciudad metropolitana actual. Una aproximación a la dimensión fractal de las áreas metropolitanas andaluzas

## Morphogenesis of the current metropolitan city. An approach to the fractal dimension of the Andalusian metropolitan areas

Claudia Hurtado Rodríguez <sup>1</sup>

<sup>1</sup>(Departamento de Geografía, Historia y Filosofía. Universidad Pablo de Olavide, Sevilla) churrod@upo.es

**Palabras clave:** morfología urbana, dimensión fractal, área metropolitana, morfogénesis, crecimiento urbano

**Keywords:** urban morphology, fractal dimension, metropolitan area, morphogenesis, urban growth

### Resumen:

El estudio de la morfogénesis de los espacios metropolitanos se ha asociado principalmente a fenómenos de difusión espacial. Estos procesos, alimentados en gran medida por un uso masivo del transporte privado, muestran una realidad urbana de creciente complejidad y han superado con creces los límites de la ciudad de principios del siglo XX, afectando de un modo muy particular a la morfología de las ciudades europeas mediterráneas que se han caracterizado por mantener durante siglos su naturaleza compacta y multifuncional. En esta línea, el estudio de la morfogénesis urbana desde la geometría fractal nos plantea, mucho más allá de los enfoques más convencionales y basados en la geometría euclídea, la posibilidad de desarrollar nuevas herramientas para la identificación de patrones espaciales específicos en entornos complejos y visiblemente desordenados, como los que se desarrollan en estos territorios. De este modo, el método propuesto y su aplicación mediante el análisis de la evolución del crecimiento urbano en las áreas metropolitanas andaluzas desde un enfoque fractal, diacrónico y multiescalar pretende reforzar la hipótesis de la existencia de una serie de patrones de crecimiento urbano muy ligados a estos espacios. Finalmente, los resultados obtenidos muestran una visión muy rica y certera de la estructura que prevalece entre las partes que conforman los espacios construidos y el conjunto metropolitano. Poniendo en valor principalmente el grado de complejidad de la dinámica urbana presente en las áreas metropolitanas analizadas en su evolución desde mitad del siglo XX a principios del siglo XXI.

### Abstract:

The study of the morphogenesis of metropolitan areas has been mainly associated with urban sprawl. These processes, prompted by the massive use of private transport, show an increasing complexity in cities, exceeding the city limits of the early 20th century and affecting in particular the morphology of European Mediterranean cities characterized for centuries by maintaining their compact and multifunctional nature. In this way, the study of urban morphogenesis from a fractal geometry perspective allows us developing new tools for the identification of specific spatial patterns in complex environments, beyond conventional approaches based in Euclidean geometry. Thus the method proposed and its appliance in the analysis of urban growth in Andalusian metropolitan areas from a fractal, diachronic and multiscale approach intends to test the hypothesis of the existence of urban growth patterns closely linked to these spaces. Finally, the results show a broader and accurately perspective of the prevailing structures between all parts of built-up areas and the metropolitan city as a whole. Valuing the degree of complexity of urban dynamics in metropolitan areas analyzed by means of their evolution from the mid-20th century to the early 21st century.

La investigación se enmarca en el Proyecto "Dinámicas Socioterritoriales en las Áreas Metropolitanas Españolas: Procesos Estructurales y Cambio Cíclico (DINAMET)", financiado por el Plan Nacional de I+D (Proyectos I+D+i, código: RTI2018-095325-B-I00)

## **1. Introducción: la geometría fractal y su aplicación a los espacios urbanos metropolitanos**

El uso de la geometría fractal ha supuesto un gran paso en la comprensión de la complejidad de los sistemas urbanos, y dentro de estos en la morfogénesis de las ciudades. Revelando un “orden oculto” en la morfología urbana y destapando una serie de estructuras y organizaciones espaciales internas y muy complejas a diferentes escalas (Salat, 2011). En esta línea, numerosas aportaciones han demostrado desde el análisis de la morfología urbana cómo las ciudades, mediante su crecimiento orgánico, comparten las mismas propiedades fractales que fueron descritas por Mandelbrot para los objetos naturales (Batty y Longley, 1994; Frankhauser, 1998,2004; Thomas y otros, 2008; Tannier y Pumain, 2005). El análisis preferente de la morfología de las ciudades sobre el plano urbano desde su aproximación más local, confirmó la existencia de geometrías de naturaleza fractal especialmente en ciudades que han conservado en su trama formas de crecimiento urbano más tradicionales y orgánicas precedentes a las formas más homogéneas y lineales impuestas por el urbanismo modernista del siglo XX, orientadas estas últimas principalmente a adaptar la ciudad al uso del automóvil. De este modo, autores como Salat (2011) comparan la estructura orgánica de la ciudad histórica con la forma jerarquizada e irregular de una hoja, frente a las estructuras ortogonales propias de la planificación del urbanismo modernista. Estos estudios destacaron por otro lado la existencia de multitud de formas muy diversas que comparten el mismo orden espacial jerárquico y heterogéneo que caracteriza a las formas fractales (Thomas y otros, 2010; Frankhauser, 1998; Batty y Longley, 1994).

No obstante, mientras numerosos autores se centran en las consecuencias que el crecimiento de las ciudades tiene sobre el orden interno de las mismas, es evidente que para la ciudad contemporánea esta cuestión va mucho más allá de la reconstrucción del plano urbano hacia formas menos orgánicas y difícilmente interconectadas. El crecimiento urbano que se ha caracterizado en las últimas décadas por el uso masivo del automóvil y por la adaptación de la ciudad a los nuevos modos de movilidad se asocia a un modelo de crecimiento disperso y fragmentado, movido principalmente por el desarrollo de una densa red de carreteras que permite el establecimiento de asentamientos cada vez más dispersos y distantes de la ciudad original. Una de las principales consecuencias de este nuevo modelo es la ruptura y disolución de los límites de la ciudad compacta tradicional y la dispersión y fragmentación del tejido urbano (Monclús, 1998). Siguiendo este modelo de crecimiento, los problemas de congestión que se producen en las principales vías de transporte por el uso cada vez más intenso del automóvil genera una especie de círculo vicioso, ya que motiva la construcción de nuevas vías de transporte y a su vez alimenta la aparición de asentamientos cada vez más dispersos.

Reconocer, por tanto, una escala más acorde a la ciudad contemporánea, superando los límites administrativos que marcaban los límites de la ciudad tradicional resulta fundamental para mostrar la realidad de los procesos urbanos actuales. Para comprender la verdadera magnitud los procesos urbanos actuales debemos superar estas fronteras e ir más allá de la consideración de la ciudad como la suma de un conjunto de fragmentos independientes marcados por distintos periodos históricos donde el crecimiento pasó de ser más natural u orgánico a otro más ortogonal, para entenderla como un sistema complejo donde esta distinción entre lo autoorganizado y lo planificado se vuelve muy difusa. Y más allá de esta dualidad, nos encontramos con una amalgama o un continuo espacial donde las distintas formas de crecimiento se entremezclan en mayor o menor medida (Batty y Longley, 1994; Salingeros, 2003), lo que caracteriza la naturaleza especialmente compleja de los sistemas metropolitanos. Podemos entender, por tanto, que según esta premisa la ciudad ha cambiado de escala, pero también de forma. En esta línea, la consideración del cambio de escala es fundamental, y debe ser objeto de reflexión, principalmente porque bajo el uso de una misma aproximación pueden resultar distintas connotaciones a la hora de interpretar los resultados obtenidos. Es decir, a modo de ejemplo, la presencia de una estructura fragmentada a nivel de plano urbano puede tener una connotación positiva en el sentido en que distintos autores la consideran

como forma óptima a esta escala, y por el contrario un espacio urbano fragmentado a nivel metropolitano sugiere formas de crecimiento disperso y poco sostenible según muchos autores (Salat, 2011).

Sin embargo, aunque desde la geografía se ha comenzado a reconocer este cambio de escala de la ciudad actual, la realidad es que en cuanto al análisis de la morfología urbana las aportaciones a este nivel son aún muy escasas. En este sentido, una de las principales características de los fractales, la autosemejanza, se plantea como una forma de conectar el estudio morfológico de las ciudades a distintos niveles. La autosemejanza, que básicamente implica la existencia de la relación entre las formas a distintas escalas, se presenta de este modo como una buena herramienta para el análisis de las formas urbanas a escala metropolitana. El principio de autosemejanza sugiere así la relación de formas locales, a través del mencionado plano urbano (edificios, manzanas o red viaria intraurbana) con formas globales a una escala más amplia (mancha urbana) (Tannier, 2009).

Este trabajo se plantea desde esta premisa, y se presenta como una buena oportunidad para abordar la cuestión del crecimiento urbano de la ciudad contemporánea a un nivel más global y acorde al salto de escala necesario para entender la realidad de las ciudades actuales.

Por otro lado, y más allá de la rigidez propia de la geometría euclídea utilizada tradicionalmente en el análisis espacial, la aplicación de la lógica fractal nos permite el desarrollar herramientas muy útiles para describir y diferenciar la presencia de patrones espaciales. Más aún para el estudio de espacios especialmente antropizados, ya que, como se ha demostrado, propiedades fundamentales de los objetos fractales, como la heterogeneidad, son comunes a las propiedades de los patrones urbanos (Tannier y Pumain, 2005; Yamu y van Nes, 2017; Frankhauser, 2004). La distribución de los espacios construidos nunca es uniforme, ni denso ni diluido. En una distribución que más que desordenada o caótica, se rige por principios como la organización jerárquica o la auto-semejanza de las escalas. Por contra, enfoques geográficos tradicionales como el análisis de la distribución espacial de la población a través de su densidad o el uso de índices de análisis espacial como la autocorrelación están sujetos al problema de las PUEM y la escala o resolución espacial. (Tannier y Pumain, 2005). Esto se presenta como una limitación importante para su aplicación en espacios urbanos, caracterizados principalmente por la heterogeneidad, la fragmentación o la irregularidad de su morfología, ya que debido a estas cuestiones, se trata de aproximaciones sujetas a una distribución homogénea de sus elementos espaciales. De este modo, la matriz urbana está formada por espacios construidos que se van alternando con espacios vacíos a distintos niveles y formas, donde la aparición de formas fragmentadas e irregulares pueden describirse de mejor modo desde la geometría fractal. Y en este sentido, muchos autores han destacado el potencial de los fractales para describir, medir y analizar la complejidad inherente del crecimiento urbano.

Pero más allá de las limitaciones que puedan mostrar las aproximaciones convencionales en el análisis de sistemas complejos, la aparición de la lógica fractal en el estudio de sistemas urbanos se ha convertido en una herramienta de especial potencial al permitir sintetizar cuestiones como el grado de fragmentación, la irregularidad de las formas o la heterogeneidad de una estructura espacial a través de una única variable. La dimensión fractal parte precisamente del principio de organización jerárquica y de la distribución no homogénea de los elementos siguiendo lo que se conoce como ley de potencias o de Pareto-Zipf. Gracias a la aplicación de la misma algunos autores han podido comprobar cómo estos principios se cumplen también de forma global en sistemas urbanos a nivel metropolitano (Frankhauser, 1998; Tannier y Pumain, 2005). En esta misma línea, el trabajo planteado pretende, mediante el análisis de la morfogénesis y del crecimiento urbano de las áreas metropolitanas andaluzas, comprobar cómo en estos espacios se van generando progresivamente estructuras más complejas y heterogéneas.

## **2. El área metropolitana como ámbito de estudio**

Partiendo de los cambios profundos que ha sufrido la ciudad durante el siglo XX, con el desarrollo de la red de transporte y el uso masivo del automóvil, estudios recientes han comprobado cómo la morfología urbana ha sufrido una serie de mutaciones que se caracterizan por una intensificación del consumo del

suelo y una profunda reorganización de los espacios hacia una mayor especialización territorial dirigida a las nuevas centralidades monofuncionales, especialmente sobre espacios comerciales y terciarios (de Oliveira y Hurtado, 2017; Castells, 1990; Amendola, 2000; García y Gutiérrez, 2008). Conscientes de las implicaciones que estos cambios han provocado sobre la difusión de los límites urbanos y sobre la propia morfología de la ciudad, se propone una aproximación de la cuestión desde un ámbito más amplio al utilizado desde el urbanismo convencional. Una aproximación más vinculada con el concepto de mancha urbana como objeto de análisis (Ascher, 1995 y 2004; Font y Indovina, 2007) y que comprende al ámbito metropolitano como unidad de análisis.

En este sentido, cabe señalar que el salto a la escala metropolitana conlleva la consideración de un ámbito de difícil definición por la propia organización de los espacios urbanos y por la existencia de multitud de aproximaciones, a menudo poco operacionales (de Oliveira, 2013; Feria y Andujar, 2015). Sin embargo, cabe destacar la existencia de una serie de aproximaciones más consolidadas que se basan en la consideración del área metropolitana como un “espacio de vida”, es decir, teniendo en cuenta la movilidad pendular o cotidiana como principal indicador de la delimitación del territorio metropolitano (Castañer y otros, 2001; Feria, 2011 y 2015; Salom y Casado, 2007; OECD, 2012). En esta ocasión, para establecer el conjunto metropolitano andaluz como ámbito de estudio se decide tomar la delimitación de área metropolitana propuesta por Feria y Martínez (2016), fundamentada sobre el propio concepto de espacio de vida y operacionalmente sobre la información referente a la movilidad cotidiana. En concreto información asociada al censo de 2011, fecha ligeramente posterior a la última fecha del periodo temporal propuesto para este trabajo. Permitiendo por tanto un ajuste próximo a la configuración metropolitana propia de la última fecha analizada.

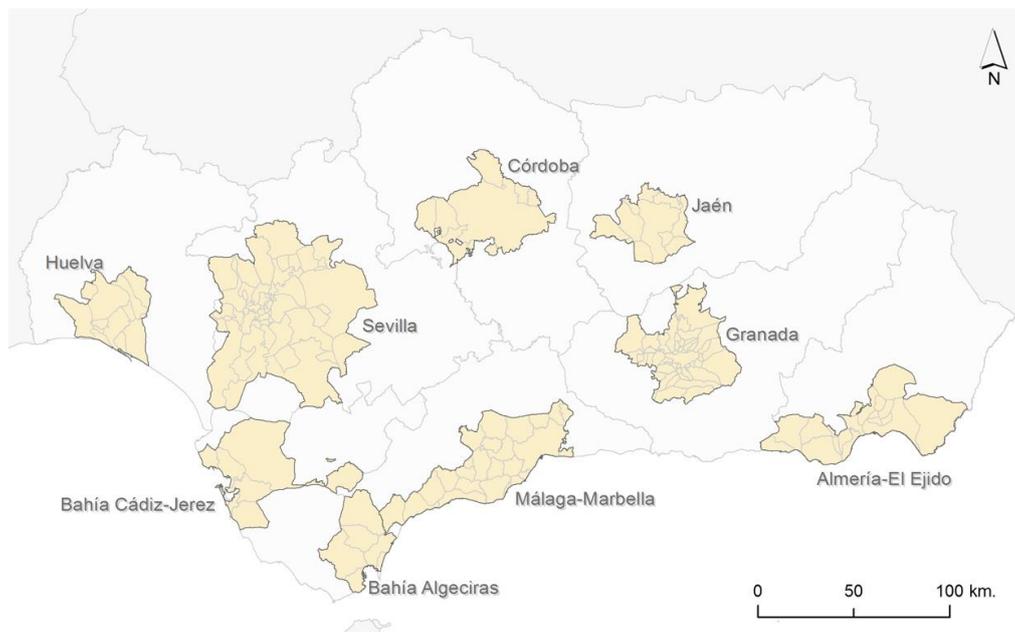


Figura 1. Delimitación de las áreas metropolitanas andaluzas. Fuente: Elaboración propia a partir de Feria y Martínez (2016)

En cuanto a las fuentes de información utilizadas en este estudio, hay que destacar el uso del Mapa de Usos y Coberturas Vegetales de Andalucía a escala 1:25.000 (MUCVA) como principal fuente cartográfica de partida para definir y caracterizar la mancha urbana o espacio construido. Una de las principales potencialidades o ventajas que ofrece MUCVA es que se trata de una base de datos espacial con una producción temporal muy amplia, ofreciendo información sobre ocupación del suelo de forma homogénea y periódica durante un periodo total de 51 años distribuidos en seis fechas (1956, 1977, 1984, 1999, 2003 y 2007). Esto nos ofrece la posibilidad de analizar el crecimiento urbano del territorio andaluz desde la mitad

del siglo XX hasta principios del XXI, en concreto hasta 2007. Última fecha disponible por un cambio de estrategia en la producción de este tipo de fuentes cartográficas por la aparición en 2005 del conocido como SIOSE (Sistema de Información sobre Ocupación del Suelo en España).

La estructura jerarquizada de MUCVA permite una aproximación multiescalar del territorio a tres niveles de desagregación (de Oliveira y Hurtado, 2017) y la distinción de los espacios más antropizados frente al resto de la matriz territorial. En esta ocasión se propone una primera aproximación a la dimensión física de los espacios urbanizados, considerando la “mancha urbana” como aquellas extensiones ocupadas por el espacio construido de distinta naturaleza según MUCVA25 a nivel 1. En particular, y para añadir una mayor precisión y adecuar la información de partida a los objetivos del estudio, se decide excluir los espacios correspondientes a zonas mineras, vertederos y escombreras, que aun formando parte de la clase “superficies edificadas e infraestructuras” a nivel 1, no deberían considerarse como elementos estrictamente urbanos (de Oliveira y Hurtado, 2015, 2017).

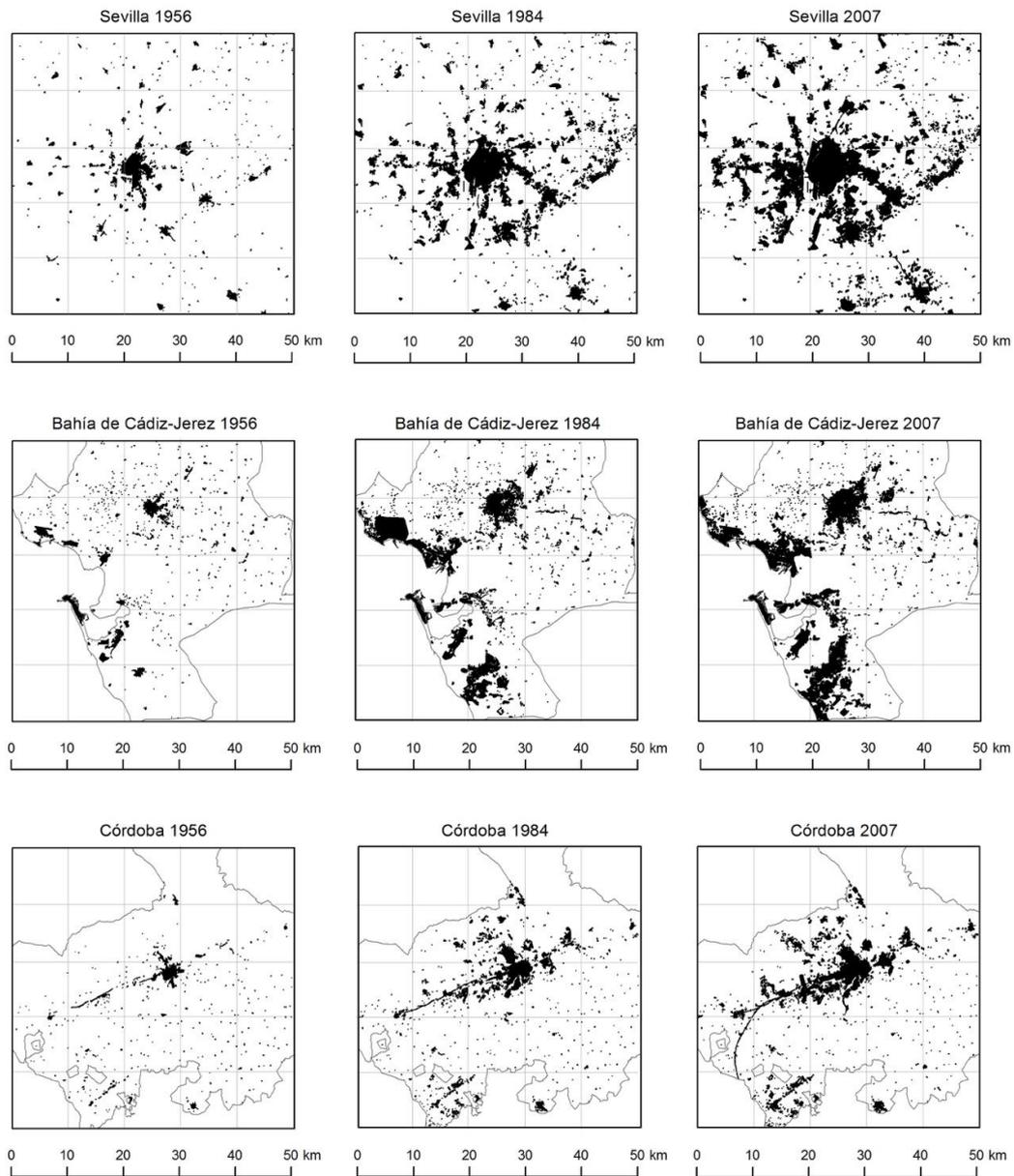


Figura 2. Evolución de la mancha urbana entre 1956 y 2007. Áreas metropolitanas de Sevilla, Bahía de Cádiz-Jerez y Córdoba. Fuente: Elaboración propia a partir de MUCVA25

Sobre la selección de los pasos temporales, se decide establecer dos periodos. El primero entre 1956 y 1984 y el segundo entre 1984 y 2007. El hecho de considerar 1984 como fecha intermedia proviene, más que por las dinámicas internas que ya han sido estudiadas en estos espacios (De Oliveira y Hurtado, 2015), por la necesidad de conocer las dinámicas metropolitanas a medio plazo en un momento en que el conjunto de los espacios parecen haber alcanzado alrededor de la mitad del recorrido hacia la configuración de sus espacios metropolitanos en relación a la fecha más reciente. Además, para algunos autores (Font y otros, 1999; Algaba, 2001), la década de los ochenta se presenta como punto de inflexión en el cambio de escala y de dinámicas propias de la ciudad metropolitana, dejando de lado el modelo intensivo y concentrado por uno nuevo más extensivo y desconcentrado (de Oliveira y Hurtado, 2017).

De este modo, y gracias a las fuentes disponibles, se dispone de información relativa a la ocupación del suelo urbano, disponible para toda la región desde los años 50, lo que permite el análisis de la evolución de la mancha urbana para el conjunto de las áreas metropolitanas andaluzas desde un momento pre-metropolitano, a través de dos periodos claves para la consolidación de estos espacios como sistemas metropolitanos. Además, la evolución del tejido urbano en las distintas áreas metropolitanas andaluzas muestra espacios con una considerable riqueza y diversidad morfológica, lo que hace aún más interesante el estudio comparativo entre las mismas (figura 2). De modo que en una misma región pueden apreciarse espacios con un crecimiento radiocéntrico (Sevilla), polinuclear reticular (Bahía de Cádiz-Jerez) o lineal (Córdoba).

### **3. Aproximación metodológica. La dimensión fractal**

Ya se ha destacado cómo el uso de la lógica fractal en el análisis de crecimiento urbano presenta un interés especial. Una de las principales características de los objetos fractales es que, independientemente de la escala a la que los observemos, siempre repiten la misma estructura. De modo que la estructura inicial se va repitiendo sucesivamente a escalas más pequeñas. Esta propiedad, conocida como auto-semejanza, se ha convertido en la base principal para comprender cómo se generan las formas fractales y las implicaciones que tienen este tipo de estructuras, especialmente porque el hecho de que las diferentes escalas estén relacionadas por algún tipo de geometría implica el estudio entre el todo y las partes de un sistema determinado, o en otras palabras, reconoce una aproximación multiescalar del sistema en su conjunto.

Cuando a esta propiedad de auto-semejanza se une que en la generación del objeto a lo largo de las distintas escalas no interviene el azar, se considera que se trata de un fractal determinístico. Este tipo de fractales, puramente matemáticos, fueron creados para demostrar cómo partiendo de una estructura original sencilla y por iteración de una serie de reglas simples, se pueden generar estructuras de cierta complejidad. En este caso, las estructuras autosemejantes van generándose hasta escalas infinitesimales, tal y como lo hacen los conocidos fractales matemáticos como la curva de Koch, o como la alfombra de Sierpinski (figura 3).

Los fractales matemáticos han sido ampliamente estudiados, llegando a demostrarse su utilidad como base a la hora de describir, caracterizar y modelizar sistemas asociados a procesos reales. Si bien, no dan cuenta exacta de la realidad mucho más compleja que muestran estos sistemas, y en particular por la complejidad inherente de los sistemas urbanos, movidos por multitud de condicionantes físicos o territoriales, sociales, económicos y por una serie de elementos emergentes propios de los sistemas complejos. Así, se entiende que las estructuras generadas en situaciones reales sean efectivamente autosemejantes, pero sólo hasta cierto punto. Es decir, al contrario que los fractales matemáticos o puros, estos no son autoreproducibles hasta el infinito, sino que lo hacen sólo a ciertas escalas. Esto explica, por otro lado, que estructuras que son suficientemente complejas e irregulares compartan estos mismos principios con los fractales determinísticos y muestren finalmente formas muy diferentes. Esto es algo especialmente interesante porque bajo esta hipótesis, y partiendo de los mencionados fractales matemáticos, se han tratado muchos estudios que abordan el análisis morfológico de espacios urbanos

muy diversos en cuanto a forma y estructura desde una misma aproximación, y de forma mucho más cercana y comparable a la realidad urbana que el tratamiento convencional de la geometría euclídea.

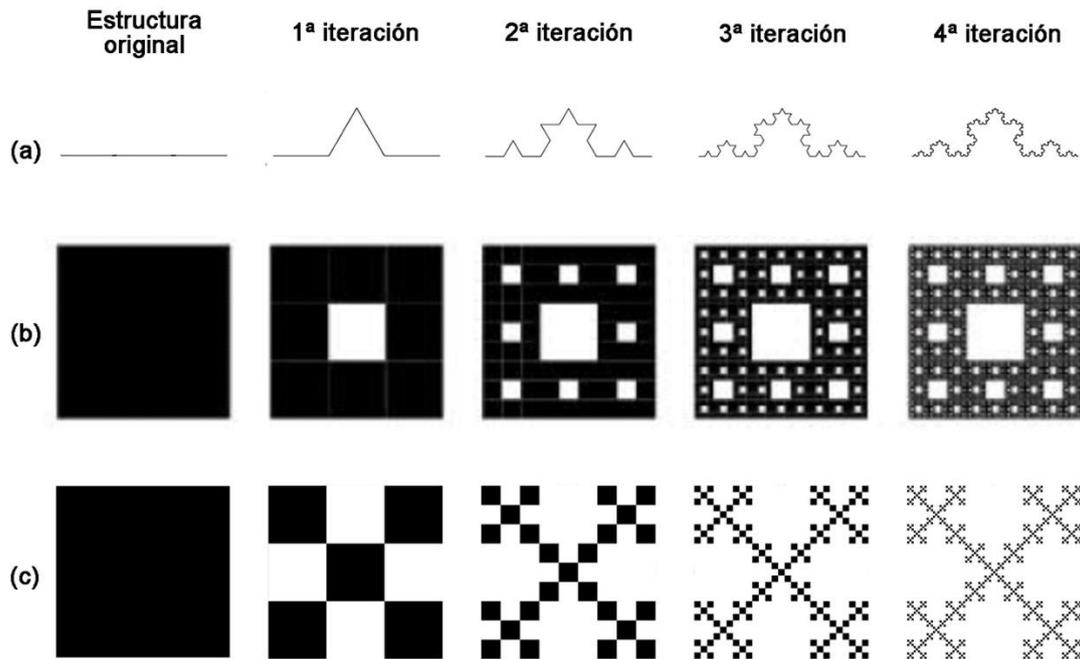


Figura 3. Fractales matemáticos construidos por sucesivas iteraciones. (a) Copo de nieve de Kosh, (b) Alfombra de Sierpinski, (c) variante de alfombra de Sierpinski. Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, y más allá de las limitaciones que han mostrado las aproximaciones convencionales en el estudio de sistemas complejos, la lógica fractal se muestra como una herramienta de bastante interés porque permite sintetizar el grado de fragmentación, irregularidad o heterogeneidad de un objeto o una estructura espacial a través de una única variable, la dimensión fractal ( $D$ ). Este índice sintético se fundamenta en otro de los principios básicos de las formas fractales, la organización jerárquica y la heterogeneidad de sus elementos. Lo que viene a decir que, en concreto, la distribución no homogénea de los elementos que forman parte de una estructura fractal se organiza según la ley de potencias o de Pareto-Zipf. Es decir, los elementos están relacionados en rango y tamaño de forma potencial, de modo que los elementos de menor tamaño son mucho más numerosos que los elementos mayores. De forma resumida, lo que nos muestra la dimensión fractal es hasta qué punto una figura o un objeto se desvía sobre esta distribución teórica. Y en línea con otro de los principios básicos de los objetos fractales, su naturaleza multiescalar, la dimensión fractal permite explorar de qué modo la superficie o los bordes de un objeto cambian a lo largo de las escalas.

Desde un enfoque convencional, basado en figuras geométricas básicas, la dimensión de un objeto sólo puede tomar valores enteros; 0 para un punto aislado, 1 para una línea, 2 para una superficie plana y 3 para un objeto tridimensional. Por el contrario, los objetos fractales presentan dimensiones con valores fraccionales. En el caso concreto del análisis de la superficie urbana, representada por un espacio bidimensional, esta puede tomar valores fraccionales entre 0 y 2 (figura 4). De esta forma,  $D < 1$  corresponde a una distribución de elementos desconectados o aislados, en este caso representado por nodos, mientras que  $D > 1$  indica elementos conectados formando clusters de mayor o menor tamaño, tendiendo progresivamente a valores próximos a 2 mientras mayores conexiones se establezcan, aproximándose finalmente a un único clúster o polígono que rellenaría todo el espacio. El modo en que estos clusters se van formando progresivamente estaría directamente relacionado con el grado de

homogeneidad o heterogeneidad en la distribución de los objetos en superficie. En este sentido, distintos autores afirman que valores bajos de  $D$  indican una fuerte jerarquía, mientras que valores cercanos a 2 corresponden con distribuciones más homogéneas o uniformes (Frankhauser, 1998, 2004; Lagarias y Prastacos, 2018).

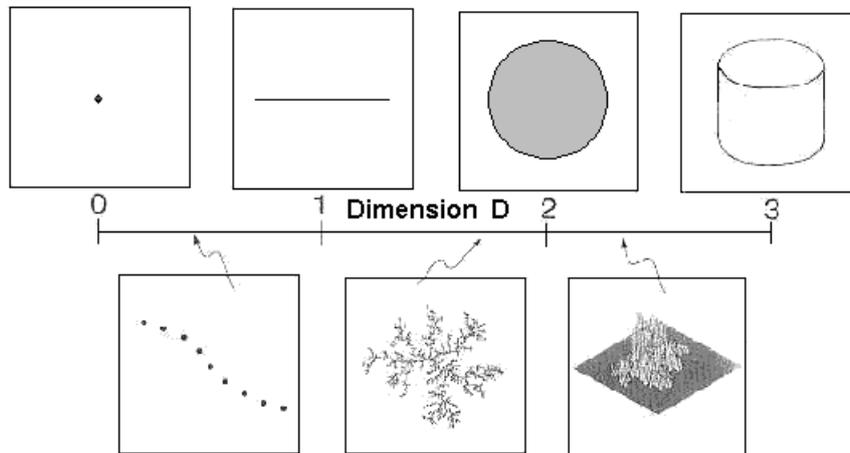


Figura 4: Comparación entre dimensiones de geometría tradicional y geometría fractal. Fuente: Cagliani y Giovanni, 2004.

De modo que la dimensión fractal de un objeto se ve determinada por la disposición o la distribución de las distintas partes que la forman y con su grado de uniformidad, mientras que no guarda relación alguna con la densidad (Batty y Longley, 1994; Batty y Xie, 1996; Thomas y otros, 2007, 2008).

Aplicando esta lógica a los fractales matemáticos presentados en la figura 3, se trataría de figuras distribuidas de forma más uniforme en el caso de la alfombra de Sierpinski (b), con  $D=1,89$ , que en el caso de su variante (c), ésta última con  $D=1,47$ . El análisis de estos fractales matemáticos ha adquirido especial importancia por su aplicación en los últimos años en el estudio de la morfología urbana. Autores como Frankhauser, Tannier, Batty o Chen han llegado a relacionar la presencia de estructuras jerárquicas en una serie de aglomeraciones urbanas con la distribución espacial presente en la variante de la alfombra de Sierpinski (figura 4c). En este caso, interés del fractal matemático radica en que se genera por la formación sucesiva de clusters jerárquicos de diferentes tamaños, y por otro lado el borde de la estructura va adquiriendo progresivamente una mayor sinuosidad. Tratándose de un patrón espacial que se asemeja en buena medida a las transformaciones urbanas que según el autor surgen en los nuevos espacios metropolitanos, hacia la generación de formas cada vez más complejas e irregulares (Frankhauser, 1998).

Del mismo modo, distintas aportaciones de otros autores han aplicado la dimensión fractal tanto a superficies como a bordes urbanos. En este sentido, mientras que ya se ha señalado que la dimensión de la superficie pone en valor la parte mayormente estructural del objeto en cuestión (homogeneidad/heterogeneidad en la distribución), la dimensión de borde trata en mayor medida la textura de la forma (Chen y Wang, 2016), es decir, el grado de irregularidad o de sinuosidad del borde urbano. Otros han tratado de poner en valor el grado de compacidad, dispersión o fragmentación del hábitat urbano mediante la relación  $D_{\text{borde}}/D_{\text{superficie}}$  (Lagarias, 2007; Chen y Wang, 2016; Cagliani y Giovanni, 2004; Frankhauser, 1998).

Volviendo la cuestión planteada en este trabajo, la dimensión fractal medida sobre la superficie urbana se ha convertido en un buen instrumento para la comparación de la morfología de las ciudades a nivel global: con tendencia a distribuciones más homogéneas en el caso de muchas de las ciudades norteamericanas y australianas (dimensión fractal próxima a 2), y por contra mucho más variables para ciudades europeas,

caracterizadas la presencia de mayores gradientes desde los núcleos centrales hacia la periferia (dimensión fractal entre 1 y 2, pero normalmente más próxima a 1) (Batty y Longley, 1994; Tannier y Pumain, 2005; Frankhauser, 1998).

En cuanto al cálculo de la dimensión fractal, aclarar que existen varios métodos disponibles, tanto a nivel global, para el análisis de un espacio en su conjunto, como a nivel local, para un análisis más pormenorizado de los cambios o fluctuaciones internas. De este modo, para un enfoque más integral y global del sistema, son varios los métodos disponibles. Uno de los más extendidos en la literatura científica, y el que hemos considerado para este trabajo, es el conocido como método de conteo de cajas o método grid. Este método consiste en cubrir la zona de estudio por un grid o ventana cuadrada de longitud variable ( $\epsilon$ ), de modo que para cada valor de  $\epsilon$  se contabiliza el número de cuadrados  $N(\epsilon)$  donde se localizan zonas construidas. Los valores de  $\epsilon$  y  $N(\epsilon)$  pueden representarse en un gráfico donde el eje X es el tamaño de la ventana ( $\epsilon$ ) y el eje Y el número de ventanas con zonas construidas  $N(\epsilon)$ . Finalmente, la curva empírica obtenida se ajusta a una curva teórica que corresponde con la ley de potencias, principal fundamento de la lógica fractal, representada según el algoritmo:

$$N(\epsilon) = \text{const} * \epsilon^{-D}$$

Con este modelo lo que realmente estamos representando es una distribución espacial heterogénea o jerárquica de los elementos espaciales, ya que en la medida que el ajuste entre ambas curvas (empírica y teórica) es mayor, podemos decir que la distribución del tejido urbano cumple la ley fractal de Pareto-Zipf. Es decir, se verifica que la presencia de elementos o manchas de mayor dimensión es mucho menor que los de menor tamaño (Tannier y Pumain, 2005).

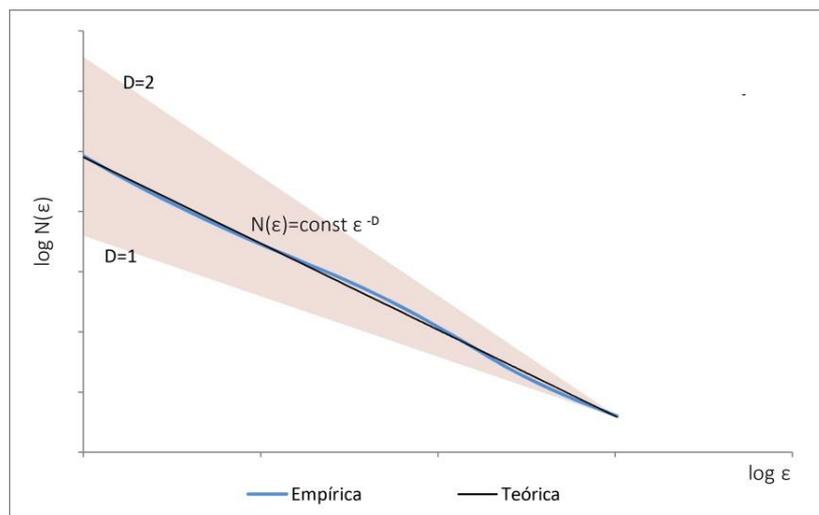


Figura 5. Representación logarítmica de curvas empírica y teórica obtenidas según método de conteo de cajas dentro del rango de dimensiones 1 y 2. Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, con la representación logarítmica de  $\epsilon$  y  $N(\epsilon)$  se puede apreciar cómo la pendiente de la curva, que se encuentra entre los valores 1 y 2, corresponde con la dimensión fractal de la estructura espacial en cuestión (figura 5). De modo que cuanto mayor sea la pendiente de la curva más se acerca a  $D=2$

Partiendo de estos principios, en este trabajo se propone una aproximación diacrónica para el estudio del crecimiento urbano metropolitano desde el análisis de la dimensión fractal de la mancha urbana, es decir, cómo va evolucionando la distribución del tejido urbano en función del grado de heterogeneidad o a la uniformidad que va adquiriendo a lo largo del proceso de metropolización. Del mismo modo que se pretende estudiar si estos espacios metropolitanos siguen la misma lógica fractal durante todo el periodo analizado, o por el contrario esta distribución se genera únicamente en aquellos espacios que ya en una fase más reciente han adquirido cierto grado de madurez.

Para poder aplicar el cálculo de la dimensión fractal se utiliza el software fractalyse. Este programa, desarrollado para analizar el comportamiento fractal de imágenes raster ha sido muy utilizado en análisis de morfología urbana (De Keersmaecker y otros, 2003; Thomas y otros, 2007, 2008). A efectos prácticos cabe destacar que se utiliza imágenes raster binarias, donde los píxeles negros corresponden a la superficie construida, mientras que los píxeles blancos son espacios libres o no construidos. La idea del uso de este software es analizar si la distribución de los espacios construidos y la forma en que va llenando progresivamente los espacios libres se ajusta a los principios de orden fractal, de modo que gracias a la aplicación del mismo se puede obtener tanto la dimensión fractal de la figura representada (D) como el coeficiente de determinación ( $r^2$ ), que muestra el grado de ajuste entre la curva teórica y la curva empírica. Según esto último, se considera que la dimensión fractal obtenida es fiable para  $r^2 > 0,99$ , y por tanto podemos confirmar que la estructura sigue una lógica fractal. En caso contrario se considera que el patrón espacial en cuestión no es fractal, o en cualquier caso multifractal (Jia y otros, 2019; Lagarias y Prastacos, 2018).

#### 4. Resultados

Gracias a los resultados presentados se ha podido obtener, mediante la aplicación de un indicador sintético, una primera aproximación, sobre la distribución más o menos homogénea o uniforme del tejido urbano para las distintas áreas metropolitanas andaluzas. Analizando así la evolución de la estructura urbana desde un momento pre-metropolitano (primer año) hasta principios del siglo XXI, donde las distintas áreas metropolitanas muestran en mayor o menor medida cierto grado de madurez. La incorporación de una fecha intermedia dentro de este periodo nos aporta además una visión más precisa sobre la intensidad del proceso de metropolización y su incidencia sobre la morfología urbana.

Entre los resultados obtenidos, la primera cuestión que cabe destacar es el grado de ajuste del método utilizado. Sobre este punto, la variable de ajuste ( $r^2$ ) está directamente relacionada con la naturaleza fractal del tejido urbano, y nos aporta una idea sobre el grado de complejidad que presentan las distintas áreas metropolitanas.

En este sentido, tal y como podría esperarse, los resultados nos indican una evolución general positiva en el grado de ajuste. Lo que quiere decir que a nivel general, y a excepción del área metropolitana de Algeciras, el sistema metropolitano andaluz evoluciona hacia formas más complejas. De modo que en un primer momento pre-metropolitano (1956), sólo las áreas metropolitanas de Bahía de Cádiz-Jerez, Granada y Sevilla muestran un comportamiento fractal ( $r^2 > 0,99$ ), lo que refleja el grado de consolidación o de madurez que presentaban estos espacios metropolitanos ya desde los años 60. Mientras que en 2007, a excepción de Bahía de Algeciras, Huelva y Jaén, todas presentan ya un elevado grado de complejidad. Si bien, las tres áreas metropolitanas mencionadas se acercan bastante al umbral considerado para las estructuras fractales.

Área Metropolitana	1956	1984	2007
Almería-Ejido	0,925	0,980	<b>0,990</b>
Bahía Algeciras	0,950	0,900	0,926
Bahía Cádiz-Jerez	<b>0,990</b>	<b>0,990</b>	<b>0,990</b>
Córdoba	0,970	<b>0,990</b>	<b>0,997</b>
Granada	<b>0,992</b>	<b>0,996</b>	<b>0,990</b>
Huelva	0,871	0,952	0,964
Jaén	0,919	0,956	0,962
Málaga-Marbella	0,987	<b>0,999</b>	<b>0,994</b>
Sevilla	<b>0,990</b>	<b>0,996</b>	<b>0,996</b>

Tabla 1. Valor de R2 para las áreas metropolitanas andaluzas. Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la dimensión fractal obtenida para los distintos espacios analizados, se puede apreciar gracias al análisis diacrónico cómo en términos generales se produce un aumento generalizado de la misma en el conjunto de los espacios metropolitanos, con valores iniciales muy bajos en todos los casos, muy cercanos a 1 a excepción del área metropolitana de Bahía de Cádiz-Jerez (figura 6). Esto puede ser indicador del carácter mayormente compacto del tejido urbano y la falta de conexión entre las partes que forman el entramado urbano en un momento pre-metropolitano. No obstante, la evolución de las distintas áreas metropolitanas muestra cómo se han producido cambios significativos en la estructura espacial de las mismas. Cambios que se producen con especial intensidad en el periodo 1956-1984. En este sentido cabe destacar la evolución sufrida en las áreas metropolitanas costeras de Málaga-Marbella y Almería-Ejido. Ambas con unos valores especialmente bajos en origen (muy próximos a 1), presentan valores de  $D > 1.2$  al finalizar este primer periodo.

Se puede confirmar por tanto que, en términos generales, se trata de una evolución positiva para todo el periodo analizado que si bien se sigue manteniendo durante el segundo periodo (1984-2007), se produce de un modo mucho más contenido que en el periodo anterior. No obstante, áreas metropolitanas de menor tamaño como Huelva, Jaén o Almería-El Ejido continúan durante este último periodo con una progresión mayor que las áreas metropolitanas que, como en los casos de Sevilla, Granada o Bahía de Cádiz, parecen mostrarse ya más consolidadas. Por otro lado, si comparamos la tendencia del conjunto andaluz en los últimos años, avanzando en la mayoría de los casos hacia valores próximos a 1.5, se podría considerar que la evolución de la forma urbana tiende hacia la una distribución heterogénea y jerárquica de sus elementos estructurales, en la línea de los resultados obtenidos por otros autores en el análisis morfológico de otras ciudades europeas. Una tendencia que, por otro lado, se encuentra muy alejada de la distribución más uniforme que muestran muchas ciudades norteamericanas o australianas, tal y como hemos visto, con valores muy próximos a 2. Esta tendencia hacia la heterogeneidad estructural de la mancha urbana se puede apreciar especialmente para áreas metropolitanas costeras como Málaga-Marbella o Bahía de Cádiz-Jerez y para otras de interior como Sevilla, en cualquier caso consideradas como áreas metropolitanas muy consolidadas y maduras.

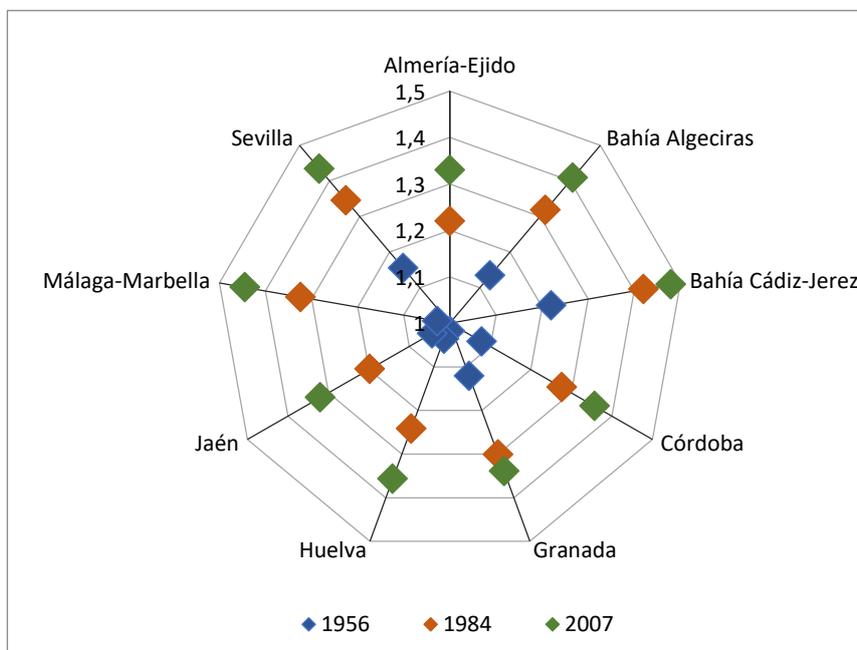


Figura 6. Evolución de Dimensión Fractal para conjunto metropolitano andaluz según el método de grid. Fuente: elaboración propia

Finalmente, para profundizar en el modo en que el crecimiento urbano ha incidido sobre la evolución metropolitana hacia estructuras más complejas, resulta interesante comprobar cómo las transformaciones morfológicas generadas en estos espacios a lo largo del tiempo parecen guardar cierta relación con la colmatación progresiva de los mismos (porcentaje de suelo urbano sobre el total metropolitano). De tal modo que se puede apreciar cómo, en términos generales, la mancha urbana tiende a una organización más jerarquizada y heterogénea de sus partes conforme se va produciendo el llenado progresivo de los espacios metropolitanos. Relación que se produce en tal caso de forma exponencial (figura 7).

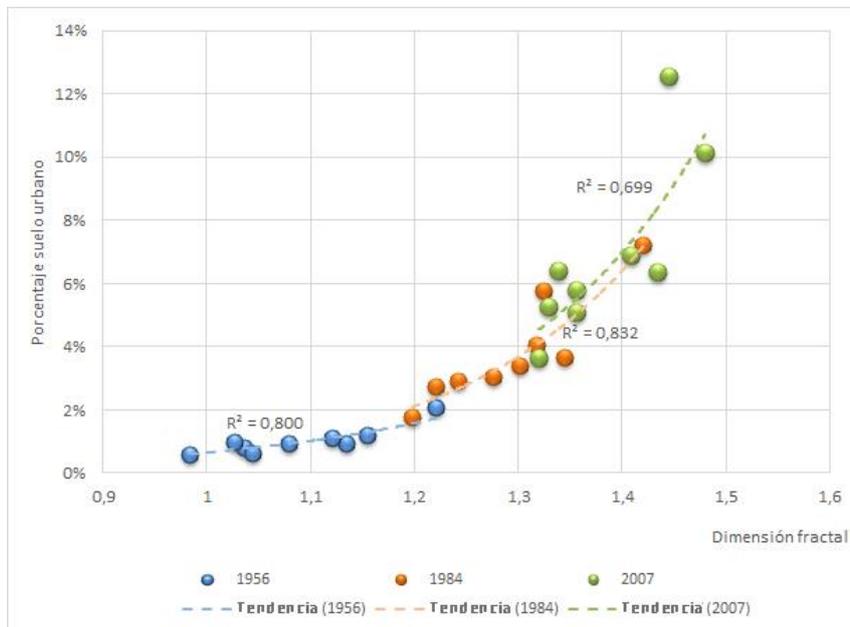


Figura 7. Evolución del espacio urbanizado frente a la dimensión fractal para los años 1956, 1984 y 2007. Fuente: elaboración propia.

Además, observando esta tendencia para los tres años analizados, se puede apreciar cómo el último año tiene un ajuste menor que en los dos anteriores, quizás por la presencia de espacios que, como Málaga-Marbella o Sevilla, se desmarcan especialmente de la tendencia del conjunto andaluz. La primera por sobreestimar el porcentaje de suelo urbanizado sobre el total metropolitano, y el segundo por el contrario por presentar un porcentaje urbanizado especialmente bajo en relación a la dimensión fractal obtenida. De hecho, resulta llamativo que ambas áreas metropolitanas, presentando dimensiones similares muestren un crecimiento urbano en términos relativos tan desigual, hasta tal punto que el porcentaje urbanizado en Málaga-Marbella duplica al de Sevilla, con más del 12% del total del espacio metropolitano urbanizado frente al 6% de Sevilla.

## 5. Discusión e interpretación de resultados

De acuerdo con los principios de la geometría fractal y en relación a su aplicación al estudio de la morfología urbana, formas de desarrollo relativamente homogéneas resultan en valores de D próximos a 2, mientras que valores menores, entre 1.5 y 1.7, muestran por contra patrones de crecimiento más heterogéneos y diversos. A la hora de interpretar los resultados obtenidos en la evolución de los distintos espacios analizados, valores cercanos a 1 para el año inicial indican la formación de clusters compactos y desconectados entre sí o en cualquier caso aislados espacialmente. La matriz urbana muestra aun una estructura escasamente articulada a escala metropolitana, con alguna excepción que, como en el caso de Bahía de Cádiz-Jerez, muestra ya cierto grado de diversidad o madurez, e incluso indicios muy tempranos de un crecimiento polinuclear. Se entiende que esto último pueda ser el resultado de espacios que estaban

formados ya en los años cincuenta por una serie de asentamientos tradicionales muy consolidados aun tratándose de un momento pre-metropolitano.

En cuanto a la evolución sufrida en los dos periodos analizados, se aprecia un aumento mayor de la dimensión fractal en el primer periodo. En este sentido es interesante comprobar cómo los distintos espacios analizados tienden con bastante intensidad a la formación de clusters relativamente heterogéneos y diversos, mostrándose así como un periodo especialmente dinámico en cuanto a los procesos de crecimiento urbano. El segundo periodo continúa, aunque de forma más contenida, con una evolución hacia organizaciones más heterogéneas, mostrando finalmente valores de dimensión fractal próximos a 1.5. Valores muy próximos a los obtenidos por otros autores que indican patrones de desarrollo cada vez más contrastados y fragmentados. Estos resultados contrastan con otros patrones de crecimiento mucho más homogéneos, con desarrollos relativamente uniformes y por tanto, con dimensiones fractales significativamente mayores. No obstante, la evolución mostrada con el tiempo, hacia el aumento progresivo de  $D$  puede indicar una posible tendencia hacia modos de crecimiento cada vez más dispersos, y que conduzcan con el tiempo a la aparición de organizaciones mucho más homogéneas. Más aun en aquellos espacios que cuenten con una mayor predisposición hacia la intensificación del crecimiento urbano, carentes de elementos fisiográficos o territoriales que limiten este crecimiento, o sin una planificación integral orientada a la contención de la dispersión urbana.

También es interesante destacar cómo se han mostrado tendencias similares en espacios muy diversos en cuanto a forma urbana y características del propio territorio. Áreas metropolitanas de interior, con una red de transporte bastante consolidada y con un crecimiento radiocéntrico muy pronunciado, como los casos de Sevilla o Granada, presentan dimensiones fractales similares a las obtenidas en espacios metropolitanos costeros como Málaga-Marbella, con un crecimiento más lineal, condicionado en esta ocasión por un relieve muy accidentado y por el desarrollo urbano progresivo y continuado a lo largo de toda la línea de costa. Por otro lado, dimensiones fractales ligeramente menores como las obtenidas en las áreas metropolitanas de Almería-El Ejido o Jaén pueden ser indicador de organizaciones espaciales de una menor complejidad o de un estado de madurez inferior al mostrado por las anteriores. No obstante, hay que tener en cuenta las diferencias marcadas en cuanto a la intensidad de los procesos urbanos en los distintos periodos analizados. Destacando que el fenómeno de expansión urbana está condicionado por distintas situaciones de partida y por diferentes intensidades de crecimiento entre los distintos espacios metropolitanos.

Por último, comentar que si bien la ocupación urbana del espacio metropolitano es aún residual, abarcando entre el 4 y el 12% de la superficie total, es cierto que la intensidad en cuanto a la superficie urbanizada es fundamental para entender el nivel de desarrollo y de madurez que van adquiriendo estos espacios.

## **6. Conclusiones**

El planteamiento de este trabajo y aplicación del método diacrónico propuesto en las áreas metropolitanas andaluzas sugiere, por un lado, que el proceso de expansión urbana se acompaña de forma general de la aparición estructuras fractales a escala metropolitana. De hecho esta organización tiende a generarse con mayor fuerza en los espacios metropolitanos que van evolucionando hacia estados de mayor madurez y complejidad. Este hecho viene a reforzar la hipótesis de que el proceso de crecimiento urbano en entornos metropolitanos resulta en una organización espacial de naturaleza multiescalar caracterizada en buena medida por la existencia de una fuerte jerarquía en la distribución de los distintos agregados que forman la mancha urbana. En este sentido, la evolución de la dimensión fractal a lo largo del tiempo nos muestra cómo el modelo urbano se autoorganiza progresivamente, siguiendo un gradiente centro-periferia, alrededor de la mancha o manchas urbanas principales.

Por otra parte, la lógica multiescalar descrita implica la existencia de una relación entre las formas locales o intraurbanas y las formas globales o generadas a escala metropolitana. Si bien esto no quiere decir que la

morfología de la ciudad se reproduzca de igual modo a distintas escalas de análisis, ya que no estaríamos hablando de estructuras fractales “estrictas”, sí que puede ser indicador de una misma lógica en la disposición de los elementos que forman parte del tejido urbano a diferentes niveles.

Se ha podido comprobar, además, cómo la progresiva ocupación de espacios libres no urbanizados guarda una relación directa y exponencial con el aumento de la dimensión fractal. Dentro de esta tendencia general, destacan casos concretos de espacios metropolitanos, como los de Málaga-Marbella o Sevilla, que han sufrido una evolución muy dispar en cuanto a intensidad de crecimiento y en cuanto a forma urbana generada (radiocéntrica en el caso de Sevilla y lineal en caso de Málaga-Marbella), y que tienden a una misma organización jerárquica de sus elementos estructurales. Este hecho refuerza la idea de que las condiciones territoriales, físicas o socioeconómicas propias de los espacios metropolitanos contribuyen a la generación de macroestructuras muy diversas que tienden a seguir, no obstante, los mismos principios fractales a nivel global.

El análisis global de la morfología urbana en entornos metropolitanos y su evolución a lo largo del tiempo se plantea como una buena aproximación de partida para futuros estudios más orientados al análisis de la evolución del proceso de crecimiento urbano metropolitano mediante herramientas de análisis fractal local. De tal modo que los mismos principios planteados en este trabajo se puedan adoptar para distinguir ciertos componentes o fluctuaciones de orden interno que actúen como elementos diferenciadores sobre las tendencias globales descritas en este trabajo. Algo que podría contribuir a la identificación de patrones concretos de crecimiento urbano muy desarrollados conceptualmente y fuertemente ligados a estos espacios.

## Bibliografía

- Algaba Calvo, A. 2001. Las nuevas dinámicas metropolitanas. El estudio de los cambios acontecidos en el Área Metropolitana de Barcelona a través de algunas publicaciones recientes. *Biblio 3w: revista bibliográfica de geografía y ciencias sociales*, 271. Disponible en : <http://www.ub.edu/geocrit/b3w-271.htm>
- Amendola, G. 2000. *La ciudad postmoderna*. Madrid : Celeste Ediciones.
- Ascher, F.(1995). *Métapolis, ou l'avenir des villes*. París : Odile.
- Ascher, F. (2004). *Los nuevos principios del urbanismo*. Madrid: Alianza Ensayo.
- Batty, M. y Longley, P. 1994. *Fractal cities: A Geometry of Form and Function*. London, OK: Academic Press.
- Batty M. y Xie, Y. 1996. Preliminary evidence for a theory of the fractal city. *Environment and Planning A*, 28, 1745-1762.
- Caglioni, M. y Giovanni, R. 2004. Contribution to fractal Analysis of cities : A Study of metropolitan Area of Milan. *Cybergeo : European Journal of Geography*, 269.
- Castañer, M., Vicente, J. y Boix, G.. 2001. *Áreas urbanas y movilidad laboral en España*. Girona: Universitat de Girona.
- Castells, M. 1990. Estrategias de desarrollo metropolitano en las grandes ciudades españolas: articulación entre crecimiento económico y calidad de vida. En J.Borja, *Las grandes ciudades en la década de los noventa (17-74)*. Madrid: Fundación sistema.
- Chen, Y. y Wang, J. 2016. Describing urban evolution with the fractal parameters based on area-perimeter allometry. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2016, 1-14
- De Keersmaecker, M., Frankhauser, P. y Thomas, I. 2003. Using fractal dimensions to characterize intra-urban diversity: the example of Brussels. *Geographical Analysis*. 35 (4), 310-328.
- De Oliveira Neves, G. 2013. Los límites de lo metropolitano: estudio morfológico de la frontera urbana. En UIB (eds.), *Espacios insulares y de frontera. Una visión geográfica (349-360)*. Palma de Mallorca: AGE y Dept. de Ciències de la Terra, 349 - 360.
- De Oliveira Neves, G. y Hurtado Rodríguez, C. 2015. *Áreas metropolitanas andaluzas: desarrollo de metodologías para el reconocimiento de su dinámica morfológica*. Sevilla: Universidad Pablo de Olavide.
- De Oliveira Neves, G. y Hurtado Rodríguez, C. 2017. Expansión urbana y cohesión territorial en el proceso de construcción la ciudad metropolitana en Andalucía. *Cuadernos geográficos*, 56, 223-244.
- Feria Toribio, J.M. y Andújar Llosa, A. 2015. Movilidad residencial metropolitana y crisis inmobiliaria. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 35 (1), 13-40.
- Font Arellano, A., Llop Torné, C. y Vilanova, J.M. 1999. *La construcció del territori metropolità. Morfogènesi de la regió metropolitana*. Barcelona: Ed. Àrea Metropolitana de Barcelona i Mancomunitat de municipis, 1999.
- Font Arellano, A. y Indovina, F. 2007. *La explosión de la ciudad: Transformaciones territoriales en las regiones urbanas de la Europa Meridional*. Madrid: Ministerio de Vivienda.
- Frankhauser, P. 1998. The fractal approach. A new tool for the spatial analysis of urban agglomeration. *Population: an English selection*, 10 annee, n°1, 205-240.
- Frankhauser, P. 2004. Comparing the morphology of urban patterns in Europe. A fractal approach. En A.Borsdorf y P.A. Zembri (Eds.), *European Cities: Insights on Outskirts (79-105)*. Brussels.
- García Romero, A. y Fernández Alado, C. 1996. El sistema educativo en la nueva reforma. *Revista de Educación (Madrid)*, 309, 498-789.

- Gutiérrez Puebla, J. y García Palomares, J.C. 2008. La ciudad dispersa: cambios recientes en los espacios residenciales de la Comunidad de Madrid. *Anales De Geografía De La Universidad Complutense*, 27(1), 45-67.
- Jia, M., Liu, Y. Lieske, S. Y Chen, T. 2019. A fractal approach to explore australian urban forms and its impacting factors at neighbourhood. En C. Luca D'Acci (Ed.), *The mathematics of urban morphology* (123-144). Suiza: Springer International Publishing
- Lagarias, A. Y Prastacos, P. 2018. Comparing the urban form of South European cities using fractal dimensions. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*
- Monclus, F.J. 1998. Suburbanización y nuevas periferias. Perspectivas geográfico-urbanísticas. En F.J. Monclús (Ed.), *La ciudad dispersa*. Barcelona: Centro de Cultura Contemporánea de Barcelona.
- OECD. 2012. *Redefining "Urban". A new way to measure Metropolitan and Nonmetropolitan Area*. Paris: OCDE Publishing.
- Salat, S. 2011. *Cities and forms: On sustainable urbanism*. Hermann.
- Salingaros, N. 2003. Connecting the fractal city, Key note speech, Biennial of Towns and Town planners in Europe (Barcelona). Disponible en <http://zeta.math.utsa.edu/~yxk833/connecting.html>
- Salom, J. y Casado, J.M. 2007. Movilidad cotidiana y mercados locales de trabajo en la Comunidad Valenciana 1991-2001. *Boletín de la AGE*, 44, 5-28.
- Tannier, C. y Pumain, D. 2005. Fractals in Urban Geography: a Theoretical Outline and an Empirical Example. *Cybergeo : European Journal of Geography*, 307.
- Tannier, C. 2009. Formes de villes optimales, formes de villes durables. Réflexions à partir de l'étude de la ville fractale. *Espaces et sociétés*, 138, 153-171.
- Thomas, I., Frankhauser, P. y De Keersmaecker, M. 2007. Fractal Dimension Versus Density of the Built-up Surfaces in the Periphery of Brussels. *Papers in Regional Science*, 86(2), 287-307.
- Thomas, I., Frankhauser, P. y Biernacki C. 2008. The morphology of built-up landscapes in Wallonia, Belgium: a classification using fractal indices. *Landscape and Urban Planning*, 84, 99-115.
- Thomas, I., Frankhauser, P., Frenay, B. y Verleysen, M. 2010. Clustering patterns of urban built up areas with curves of fractal scaling behavior. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 37, 942-954.
- Yamu, C. y Van Nes, A. 2017. An Integrated Modeling Approach Combining Multifractal Urban Planning with a Space Syntax Perspective. *Urban Science* 1 (4), 37.