MORFOGÉNESIS Y FRACTALIDAD: ANÁLISIS DE LA CICLORRUTA DE BOGOTÁ, COLOMBIA

MORPHOGENESIS AND FRACTALITY: ANALYSIS OF THE CICLORRUTA OF BOGOTÁ, COLOMBIA

[1]Juan David Luján Villar, [2]Roberto Carlos Luján Villar
[1]Secretaria de Educación Distrital, Grupo de Investigación Literatura, Educación y Comunicación (LEC), Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá - Colombia,
lujanvillar@gmail.com
[2]Programa de Doctorado en Salud, Universidad del Valle, FUNDESALUD, Cali - Colombia,
janlujazz@gmail.com

Recepción / *Received:* 11, 03, 2018
Aceptación / *Accepted:* 27, 06, 2018
Publicado / *Published:* 30, 06, 2018

Resumen

Las ciudades exhiben un principio de ordenamiento fractal –patrones fractales y auto-afines o auto-similares independientes de escala–, el cual fue demostrado como característica morfológica de la complejidad urbana desde hace algunas décadas (Batty y Longley, 1994). Este estudio explora y desarrolla un abordaje complejo de la ciclorruta de la ciudad de Bogotá D.C (Colombia), a través de estimaciones fractales y densidades de sus diferentes espacios. Se utilizaron metodologías complementarias como los sistemas de información geográfica (SIG) para el procesamiento de los datos. Como resultado se evidencia los sitios de mayor y menor densidad en la estructura de la ciclorruta bogotana, como indicador de evolución y planeación. Se concluyó que el conjunto de los tamaños de las dimensiones fractales presenta una distribución tipo ley de potencia –representada por una línea en picada–, lo cual reafirma su naturaleza fractal. Como aspecto innovador este trabajo propone establecer una conexión posible entre las ciencias sociales y las ciencias de la complejidad, entre las que se encuentran la Geometría fractal, a partir de una exploración transdisciplinar que contribuya a los estudios recientes sobre complejidad urbana desde Latinoamérica.

Palabras claves: ciclorruta, dimensión fractal, fractales, morfología urbana.

Abstract

The cities exhibit a principle of fractal ordering –fractal and self-affinity or independent self-similar patterns of scale– which was demonstrated as a morphological characteristic of urban complexity for several decades. This study explores and develops a complex approach to the cycle path of the city of Bogotá D.C (Colombia) through fractal estimates and densities of its different spaces. Complementary methodologies such as geographic information systems (GIS) for the processing of data were used. As a result, the sites of greater and lesser density in the structure of the Bogota´s bikeway are shown as an indicator of evolution and planning. It was concluded that the set of sizes of the fractal dimensions has a power law distribution -represented by a dashed line- which reaffirms its fractal nature. As an innovative aspect, this work proposes to establish a possible connection between the social sciences and the complexity sciences, among which are the fractal geometry,

from a transdisciplinary exploration that contributes to the recent studies on urban complexity from Latin America.

Keywords: bikeway, fractal dimension, fractals, urban morphology.

Introducción[1]

Las ciudades presentan en su morfología propiedades fractales de los conglomerados que forman sus estructuras características. Estos conglomerados son susceptibles de ser analizados mediante la estimación de medidas locales conocidas como *dimensión fractal*, entre otras algorítmicas, las cuales fueron empleadas además en la caracterización de la diversidad intraurbana (De Keersmaecker, Frankhauser, y Thomas 2003), aunque en Latinoamérica el abordaje de este tipo de perspectivas no constituye una mayoría en las ciencias sociales, los estudios de desarrollo sostenible y/o arquitectura.

Una breve definición del término ciclorruta empleado en este trabajo indica que: "las ciclorutas representan la conexión lineal (euclideana) de dos o más nodos origen-destino, entre los cuales existe la posibilidad de planear algún tipo de ciclovía" (Suárez Lastra, Galindo-Pérez y Murata 2016, p. 106). Así, el termino ciclorruta[2], adoptado en este trabajo, difiere de la noción de ciclovía, en tanto que esta última, en el contexto bogotano, hace alusión a diferentes espacios históricos creados por la Alcaldía Mayor de Bogotá en diferentes sitios y avenidas de la ciudad los días domingos y algunos días festivos para el tránsito de la ciudadanía, a diferencia del primero, que establece un espacio físico exclusivo para la movilidad de ciclistas.

Se considera que Bogotá es la ciudad latinoamericana con más kilómetros de ciclorruta construidos, y se considera que el 5% de los viajes en esta ciudad se realizan en bicicleta, la segunda más alta después de Rosario (Argentina) que reporta 5,3%. Bogotá posee la mayor infraestructura ciclística de las ciudades latinoamericanas (392 km), comparada con diferentes ciudades como Monterrey (México) que posee 0,4 km de infraestructura para bicicletas (Ríos Flores et al., 2015). En este estudio no se tuvo en cuenta –por obvias razones–, los 2.532 estacionamientos para bicicleta que están unificados al sistema TransMilenio 17 estaciones de la capital.

Este estudio se basa en la idea del establecimiento de dimensiones fractales, como medio para clasificar la ciclorruta bogotana usando sus densidades y accesibilidades relativas, lo cual determina e intenta explicar la medida en que ocupa el espacio que ocupa. La red de la ciclorruta urbana opera en las calles de la ciudad, ya sea de manera central o lateral. Sin embargo, ella no puede atender a todas las calles por razones de costo y accesibilidad, por esta razón la necesidad de considerar su futuro o evolución en el contexto de su planeación.

Morfología urbana

El campo de estudio conocido como morfología urbana contiene diferentes matices en sus perspectivas y abordajes. Para Oliveira (2016, p. 2), la morfología urbana establece la investigación de "formas urbanas, y de los agentes y procesos responsables de su transformación", en las cuales, "los elementos físicos que estructuran y dan forma a la ciudad: tejidos urbanos, calles (y plazas), parcelas urbanas, edificios" –entre otros aspectos geofísicos

[1] Agradecemos los oportunos y sugerentes comentarios de dos revisores anónimos. Los descargos de responsabilidad habituales se aplican.

[2] Como se puede ver en la literatura especializada algunos autores escriben *cicloruta*, en este espacio utilizamos la palabra ciclorruta (en inglés *bikeway*) por cuestiones gramáticas precisas.

que componen el hábitat humano– son estudiados. De manera general, la morfología urbana aborda bajo diversos rubros conceptuales y múltiples enfoques metodológicos las existencias físicas de las ciudades.

Este campo también se enfoca en el estudio de la evolución de las ciudades y patrones de dinámicas urbanas. Una definición bastante pragmática es realizada por Batty (2009, p. 1042), quién escribe que la morfología urbana son: "patrones de estructura urbana basados en la forma en que se ordenan las actividades con respecto a sus locaciones." En este sentido las interacciones son vistas desde las formas físicas por ejemplo, en las simulaciones de crecimiento de áreas urbanas donde se presentan progresiones determinísticas en sus desarrollos interpretadas como crecimientos orgánicos de abajo hacia arriba,[3] los cuales exhiben conglomerados auto-similares y redes de conectividad de naturaleza fractal (Batty, 2009, p. 1067).

En este sentido, los indicadores de la naturaleza fractal o la forma física urbana –por ejemplo, la densidad poblacional o las redes de transporte– son susceptibles de ser establecidos bajo la expresión de sus escalas y niveles de complejidad. A saber, la complejidad de los objetos fractales se estima en tanto elementos de representación morfológica. El concepto de morfogénesis o "el inicio de la forma" (Johnson, 2003, p. 40) invita a considerar la complejidad del mundo físico –entre ellas las ciudades– bajo la posibilidad de estudiar diversos fenómenos y sus interacciones, morfologías constituyentes, dinámicas de formación y demás dimensiones, bajo los modelos de las modernas ciencias de la complejidad; un conjunto de metaheurísticas y campos transdisciplinares que comprenden diversas metodologías, tecnologías y aparatos estadísticos al servicio de problemas anteriormente irresolubles.

En un contexto histórico la idea de un proceso morfogenético fue propuesta a nivel formal por el gran matemático Alan Turing en 1952, cuando describió la base química de un proceso semejante. Su idea se basa en la descripción matemática de un sistema de sustancias químicas estable, el cual a través de un cambio posterior puede generar un patrón o estructura debido a una inestabilidad del equilibrio homogéneo (Turing, 1952). La historia confirma que con el devenir del tiempo esta idea fue utilizada por geógrafos y arquitectos para describir de manera similar los procesos de crecimiento y la evolución urbana mediante procesos de simulación, los cuales emplean –por lo general– modelos basados en agentes (MBA´s), autómatas celulares (AC´s), fractales y multifractales, redes y teoría de grafos.

Un campo emergente a partir de esta serie de perspectivas es conocido como ingeniería morfogenética (Doursat, Sayama y Michel, 2012), el cual está en creciente auge y establece las premisas de la simulación y programación de sistemas complejos mediante diversas tecnologías. Tal como ocurre con las ciudades, la idea básica de estas estrategias recae en las propiedades que exhiben los sistemas artificiales (híbridos o tecno-naturales) entre ellas la auto-organización, la emergencia, la capacidad de auto-formación, las transiciones de fase, el establecimiento de patrones a partir del caos y la no-linealidad, a la par de la idea de una posible explicación en términos del desarrollo biológico definido mediante implementaciones matemáticas (Johnson, 2003), que posibilitan su despliegue en la investigación transdisciplinar actual.

Fractalidad urbana

En el ámbito internacional recientes investigaciones continúan con el empleo de los estimados fractales aplicados al estudio de los procesos urbanos de diferente índole; 1) los límites urbanos como criterio para la administración espacial (Jevric & Romanovich, 2016); y

[3] El concepto de abajo hacia arriba o *bottom up* es desarrollado por Batty (2009).

como criterio de estudio de las características de la estructura fractal del sistema urbano (Zhou1 & Ma 2014); 2) como estimación fractal de las redes de carreteras del área metropolitana; 3) y los impactos en el entorno urbano construido (Lu et al., 2016), entre muchas otras posibilidades analíticas.

Benguigui (1992) presentó la simulación y medición fractal de la red del ferrocarril de París, Moscú, las ciudades del Rin en Alemania y los suburbios de París. Concluía que existe un patrón único que emerge en la formación de cada conglomerado y se preguntaba por qué estas redes son fractales, ya que consideraba que era importante encontrar la característica de patrón oculto de sus estructuras, lo cual indicaba cierto nivel de universalidad en sus morfologías. Descubrió que a menor densidad en las estructuras edificadas, menor sería su dimensión fractal; París D = 1,70 + 0,05, Moscú D = 1,70 + 0,05, las ciudades del Rin en Alemania D = 1,80 + 0,05, y los suburbios de París D = 1,50 + 0,05 (Benguigui 1992, p. 386).

En tanto, caracterización de patrones urbanos, la fractalidad y sus índices conforman perspectivas metodológicas adecuadas para la descripción de la morfología geofísica (Frankhauser, 2008). Batty (2012), dentro de su propuesta de la edificación de una ciencia de las ciudades, incluye las perspectivas fractales gestadas desde la década de 1980, en estas perspectivas "se estructuraron los patrones modulares en las ciudades y utilizando ideas sobre procesos de desarrollo auto-similares, las ciudades comenzaron a interpretarse como estructuras fractales" (Batty, 2012, p. 10; Batty & Longley, 1994). En este marco conceptual se generaron los primeros estudios sobre redes urbanas, simulaciones mediante autómatas celulares, modelos basados en agentes y demás modelos matemáticos, que tienen como características el paradigma iconológico propio de la complejidad, la cual incluye la denominada ciencia de las ciudades.

Además, la dimensión fractal se puede utilizar tanto para el perímetro de la ciudad como para la superficie y morfología urbana, y su transformación a través del tiempo revela aspectos importantes de la complejidad de la transformación urbana (Lagarias, 2007), ya que posibilita establecer un indicador objetivo de la estructura espacial urbana. Desde la aparición de la geometría fractal planteada por Mandelbrot (1977), los estudios urbanos y arquitectónicos presentaron una nueva perspectiva de aplicación de análisis y además de diseño de diferentes formas y objetos (Bovill, 1996). Una investigación reciente realizada sobre la red de buses de transporte público de la ciudad de Córdoba (España), propuesta por Pavón-Domínguez et al. (2017) identificó mediante análisis fractal y multifractal la caracterización de esta red y sus modificaciones morfológicas, al crear una visualización de la red de autobuses mediante un gráfico ponderado en el que los nodos son las 366 paradas de autobús, y los bordes son la distancia entre ellos. Los investigadores determinaron una D = 1,5 para esta red de transporte, los datos en conjunto revelan que "Esta red de autobuses es muy robusta y su capacidad para cubrir la ciudad no se vería afectada por eventuales cancelaciones o cambios en cualquier ruta" (Pavón-Domínguez et al., 2017, p. 23).

Metologia y corpus investigativo

En la metodología propuesta se establecieron los diferentes métodos y técnicas derivadas de las ciencias de la complejidad y diferentes perspectivas heterodoxas:

Materiales

Para la realización de este trabajo se tuvo como referencia principal de indagación los datos ofrecidos por el Mapa de Referencia para Bogotá de La Unidad Administrativa Especial de Catastro Distrital (Uaecd) y la Gerencia (Ideca), que actualizaron los diferentes datos

espaciales de esta ciudad en su última versión V12.17[4]. Como complemento se utilizó información georreferenciada para precisar la ubicación de los tramos de la ciclorruta. A partir de esta información se realizó un gráfico ponderado, el cual establece los recorridos hasta la fecha construidos de este espacio de transporte urbano (ver figura 5).

La metodología aplicada obedece a la naturaleza de los estudios fractales y a la morfología desde una perspectiva de complejidad urbana. Para este abordaje se recurren a diferentes conceptos derivados de la geometría fractal aplicada al desarrollo y sostenibilidad urbana contemporánea. Dentro de las dinámicas de los sistemas urbanos complejos (Albeverio et al., 2008), la fractalidad se considera como una situación que propicia el establecimiento de diferentes indicadores de espacialidad como la densidad, el radio de acción de una forma urbana, la morfología territorial, su cambio paulatino, y contexto (Frankhauser, 2008).

Para el modelado, visualización y procesamiento de los materiales usados en este estudio se utilizó la plataforma QGIS 2.18.3.

Lo interesante de aplicar el análisis de estimación fractal y la densidad es que son independientes y dependen de la organización interna de la morfología del área de la ciclorruta según sus diferentes arreglos espaciales. La relación entre ambas medidas se establece como sigue: "La densidad acumulada es igual a la cantidad de píxeles acumulados divididos por el número total de píxeles en la ventana" (Thomas et al., 2007, p. 301), lo cual difiere del procedimiento de conteo de cajas que se explica más abajo. Un ejemplo de la vida real sobre esta diferenciación es presentado por Franhauser (2015, p. 20), quien escribe lo siguiente sobre este particular:

> Un área suburbana que consiste en grandes lotes donde las casas individuales están uniformemente distribuidas en el espacio tiene una dimensión fractal global de $D = 2$, pero de baja densidad. Sin embargo, un vecindario formado por casas adosadas distribuidas uniformemente a lo largo de las calles es ciertamente más denso, pero, dado que el área de construcción también se distribuye uniformemente, la dimensión fractal también sería $D = 2$.

Método de conteo de cajas o box counting

El procedimiento conocido como conteo de cajas es una implementación utilizada para realizar estimaciones fractales conocidas como dimensiones. En este estudio se utilizará como indicador la técnica de conteo de cajas (D_B), que es la pendiente de la línea de regresión para el diagrama log-log de tamaño de caja (o escala) y cuenta desde un escaneo de conteo de cajas. Este proceso se aplica a una imagen que es interpretada por diferentes números de cajas y deferentes escaneos sobre diferentes tipos áreas o subáreas dentro de una misma imagen, lo que establece una serie de indicadores de lo que denominamos complejidad. Para este proceso utilizamos la aplicación *FracLac* V.2015Sep090313a9330, la cual ofrece diversas aplicaciones. La ecuación es muy sencilla $DB= -lim[logN\varepsilon/log\varepsilon]$ y se lee como el límite negativo del radio del logaritmo de numero de cajas en una escala determinada sobre el logaritmo de esa escala (Karperien & Jelinek, 2016) (ver figura 1).

Con la finalidad de corroborar los resultados anteriores se procedió a analizar la imagen seleccionada (ver figura 5A) con otra aplicación llamada *HarFA* V.5.438 (Tomankova et al., 2006) que nos permitió realizar de modo manual el análisis. Se analizó la imagen con el algoritmo del umbral (automático) empleado en el análisis espectral, el cual funciona con una prestación de conteo de cajas como la expuesta arriba, para esta prestación se empleó el método de análisis de

[4] Los datos se pueden consultar en la siguiente dirección https://www.ideca.gov.co/es/servicios/mapa-de-referencia.

pendiente (*slope analysis*) y se basa en una forma de estimación fractal similar al análisis multifractal. En este procedimiento se analizaron 20 puntos de datos (L_{DP} = 20) (ver figura 2) y se determinó secuencialmente la dimensión fractal de los datos; 2-21, 3-22, 4-23, 5-24, 6-25, 7-26, 8-27, 10-29, y 13-32, de lo cual se obtuvo un nuevo conjunto de dimensiones fractales, y se encontró una porción lineal de la función original del programa, esta determinación se realizó con la idea de comparar estas dimensiones con los primeros resultados obtenidos.

Para el abordaje de la primera estimación fractal se utilizó una imagen de 1800 x 2746 pixeles en formato BMP, posteriormente transformada en una imagen binaria para su procesamiento mediante el conteo de cajas binario sin filtros, a partir de diferentes números de cajas en las grillas, con la finalidad de obtener diferentes estimaciones fractales. En la segunda medición, por motivos de la capacidad del segundo programa, se modificó el tamaño de la misma imagen a 1024 x 1562 pixeles, sin utilizar ningún proceso de modificación ni filtrado, también en formato BMP.

Se debe enfatizar que el valor D_B y D_F de una imagen digital depende de las elecciones hechas en el procesamiento y análisis, por ejemplo, tamaño, filtrado, elección de las piezas a analizar, entre otros. Aunque las estimaciones son objetivas, el procedimiento se podría definir como canónico en la complejidad no discursiva, el contexto de su interpretación y aplicación es definitivo para comprender las propiedades de los objetos considerados en el análisis efectuado.

En el caso del conteo de cajas se denomina un procedimiento cobertura, Frankhauser (2015) define el conteo de cajas como 'análisis de cuadricula' (*grid analysis*), debido a que este procedimiento implica un escalado de la imagen abordada para obtener a través de su escaneo diferentes perspectivas de los espacios cubiertos y vacantes de cada imagen, es decir su complejidad. En palabras de Frankhauser (2015, p. 22):

> Consiste en cubrir un zona con una cuadrícula de una malla determinada (cuadrado de cuadrícula) tamaño $\mathcal{E}$. El número de cuadrados de cuadrícula que contiene construcciones se cuenta. En el siguiente paso, el tamaño de malla se reduce y el procedimiento se repite. Al repetir el procedimiento, obtenemos una relación empírica entre el número de cuadrículas que contienen construcciones y el tamaño cuadrado de la cuadrícula.

Esto significa que el método de conteo de cajas se ajusta al escaneo y cuantificación de la imagen según el número de rejillas o cuadriculas usado, por supuesto cuando cambia también cambiará la dimensión fractal resultante. Desde una perspectiva crítica Jiang y Liu (2012) realizan un análisis en detalle del método de conteo de cajas aplicado a las formas urbanas, el cual consideran se puede mejorar mediante un procedimiento quizá un poco más complicado que su propia explicación del conteo de cajas. Su aplicación fue implementada en ArcGis y el proceso es bastante extenso para explicarlo en este lugar, de manera básica su proceso consiste si la imagen está en un formato vectorial analizar mediante una grilla rectangular y, si está en un formato *raster*, el proceso consiste en vectorizar la imagen a analizar y procesarla o convertirla en una forma rectangular (Jiang & Liu 2012, p. 47). No obstante, la posición de estos autores es favorable respecto a las estimaciones fractales mediante el conteo de cajas y sus fundamentos básicos, y reconocen que en el campo de los estudios urbanos, las dimensiones obtenidas mediante el conteo de cajas son indicadores de compactibilidad para la distribución de las áreas urbanizadas.

*Método de radio de masa (*radius mass*)*

Una tercera estimación de la dimensión fractal se realizó aplicando el método radio-masa ($D_{R\text{-}M}$), el cual busca identificar la densidad de una imagen en nuestro caso de carácter urbano. El método fue aplicado con éxito por Thomas, Frankhauser y De Keersmaecker (2007) para el estudio de la dimensión fractal de la periferia de la ciudad de Bruselas; los autores consideran que este método posibilita describir la morfología de las ciudades, simular su crecimiento y desarrollo.

Para nuestra implementación con este método se utilizó una muestra cuadrática. Este proceso se realizó de manera manual utilizando un total de 12 puntos diferentes, desde los cuales se estableció el análisis radial de la misma imagen de la ciclorruta bogotana. La imagen analizada es la misma de la primera medición 1800 x 2746 pixeles y se empleó el análisis manual de 12 zonas de la imagen con la aplicación *Fractalyse* V.2.4.1 (Thomas et al., 2007), utilizando diferentes límites en la imagen a analizar. Este procedimiento nos permite considerar diferentes dimensiones de la densidad de la imagen, y establecer otra medida de la dimensión fractal en tanto relación masa distancia. Thomas et al. (2007) consideran que la masa que se encuentra dentro de un radio ε alrededor del centro de la masa y varía de acuerdo con la ley de *scalling*:

$$\mathrm{M}(\varepsilon) = a\varepsilon^{D}$$

Donde *M(ε)* es total de la masa, *a* el "factor de forma" o "prefactor de forma", *ε* el radio, y *D* la dimensión fractal[5]. Así, la función objetivo que utiliza el programa para este parámetro (no lineal) es: $N(\varepsilon) = \varepsilon^{D} + c$, donde *c* es un parámetro que permite la compensación de los efectos locales particulares que ocurren para valores de *ε* de menos de 20 m –según la calibración realizada, pero en este estudio esa característica no aplica, no obstante su valor se reporta como indicador de complejidad (Thomas, Frankhauser y Badariotti, 2012)–, y *D* es casi siempre se estimada utilizando una representación doble logarítmica de ley de potencia. En este estudio se emplea el radio de masa de tipo regresión no-lineal, en una resolución de 1 unidad x 1 pixel, con los parámetros de centro continuo variable según cada medición proceso que se efectuó de modo manual y se podría describir como *aleatorio*, ya que se utilizaron diversos límites.

Área de estudio

Bogotá D.C. es la capital de Colombia; su ubicación geográfica encuentra una latitud de 04°36′35″N y una longitud 74°04′54″W; es la ciudad más grande del país y con mayor población 8.080.734 para el año 2017, distribuida en 1.200 barrios y 20 localidades o zonas. La importancia de la ciclorruta para esta capital es decisiva, debido a las posibilidades que brinda en términos de movilidad, las perspectivas de sostenibilidad ciudadanas responsables y la disminución de la contaminación por combustibles de fósiles.

Respecto al análisis de la distribución de la masa de píxeles que contienen rutas de la infraestructura analizada se procedió aplicando los análisis fractales descritos. Su densidad se visualizó y estimó utilizando el método de radio de masa desde diferentes puntos de la imagen resultante. Es importante expresar que el cambio de tamaño del área de referencia afecta los valores de densidad del objeto analizado, ya que los resultados de la densidad se refieren de manera estricta a la escala del análisis elegido.

Resultados y discusión

Después de realizar los procedimientos descritos en la metodología se obtuvo en los procesos de análisis los resultados presentados en la tabla 1.

Tabla 1. Dimensiones fractales para la ciclorruta de Bogotá con *FracLac.*

[5] Es importante aclarar que en el programa *Fractalyse* se define: "*a* = 1 al analizar un cuadrado negro (para el cual *D[F]* = 2, por supuesto); esto corresponde a la forma cuadrada de los píxeles" (Thomas et al., 2007, p. 306).

FracLac			
Tamaño del elemento de muestreo (cajas)	**Dimensión fractal (D_B)**	**r^2 (correlación) de D_B**	**Error estándar (SE) de D_B**
5	1,4718	0,9950	0,1001
12	1,4693	0,9957	0,0934
19	1,4554	0,9960	0,0887
26	1,4761	0,9945	0,1058
33	1,4278	0,9955	0,0923
40	1,4311	0,9956	0,0915
47	1,4257	0,9959	0,0885
54	1,4276	0,9952	0,0955
61	1,4324	0,9948	0,1001
68	1,4289	0,9962	0,0849
75	1,4253	0,9959	0,0880
2	1,4270	0,9957	0,0908

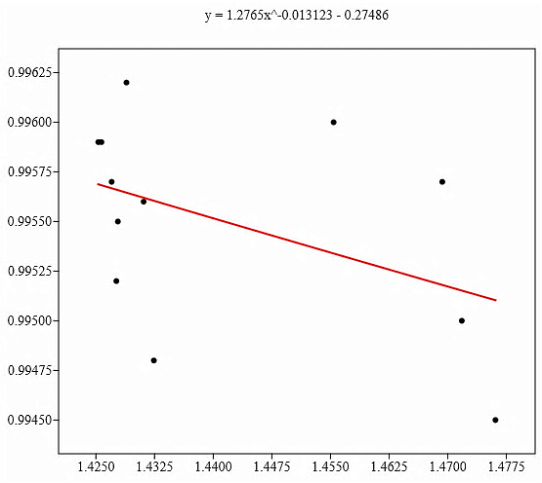


Figura 1. Ley de potencia de la D_B según la función no lineal de potencia $y= ax^b + c$, a partir de los resultados de la tabla 1. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Dimensiones fractales para la cicloruta de Bogotá con *HARFA.*

HarFA	
D_F	r^2 (correlación)
1,45425848	0,99523331
1,42445766	0,99438071
1,39117749	0,99417439
1,35928909	0,99430521
1,3274238	0,99524024
1,29770367	0,99648426
1,2739071	0,99741776
1,24261638	0,99766488
1,18972409	0,99357800

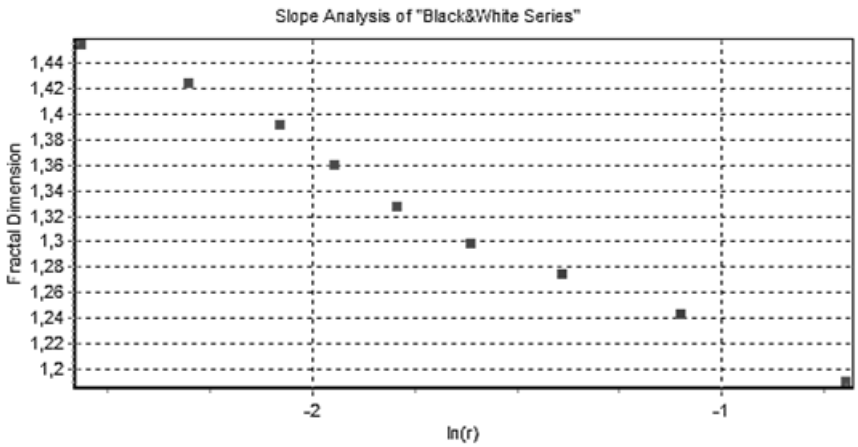


Figura 2. Análisis de pendiente de la D_F según la serie de blanco y negro de la imagen según los resultados de la tabla 2. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. Densidad para la cicloruta de Bogotá con *Fractalyse*

Fractalyse				
Muestra	**Radio-masa ($D_{R\text{-}M}$)**	***a***	***c***	**Coeficiente de correlación**
1	1,307	3,9764	-1947,2	0,996247
2	1,996	0,022257	-319,81	0,997443
3	1,306	4,1768	-3114,3	0,993217
4	1,212	6,4739	-3185,3	0,988153
5	1,589	0,48041	-934,43	0,996814
6	1,086	18,626	-49060	0,979447
7	1,223	7,6257	-3895,4	0,993001
8	1,588	0,48133	-799,12	0,997177
9	1,287	4,6622	-31650	0,995088
10	1,121	13,845	-4552,3	0,981735
11	1,451	0,86983	-1243,2	0,998165
12	1,419	1,614	-210,61	0,998813

Fuente: Elaboración propia.

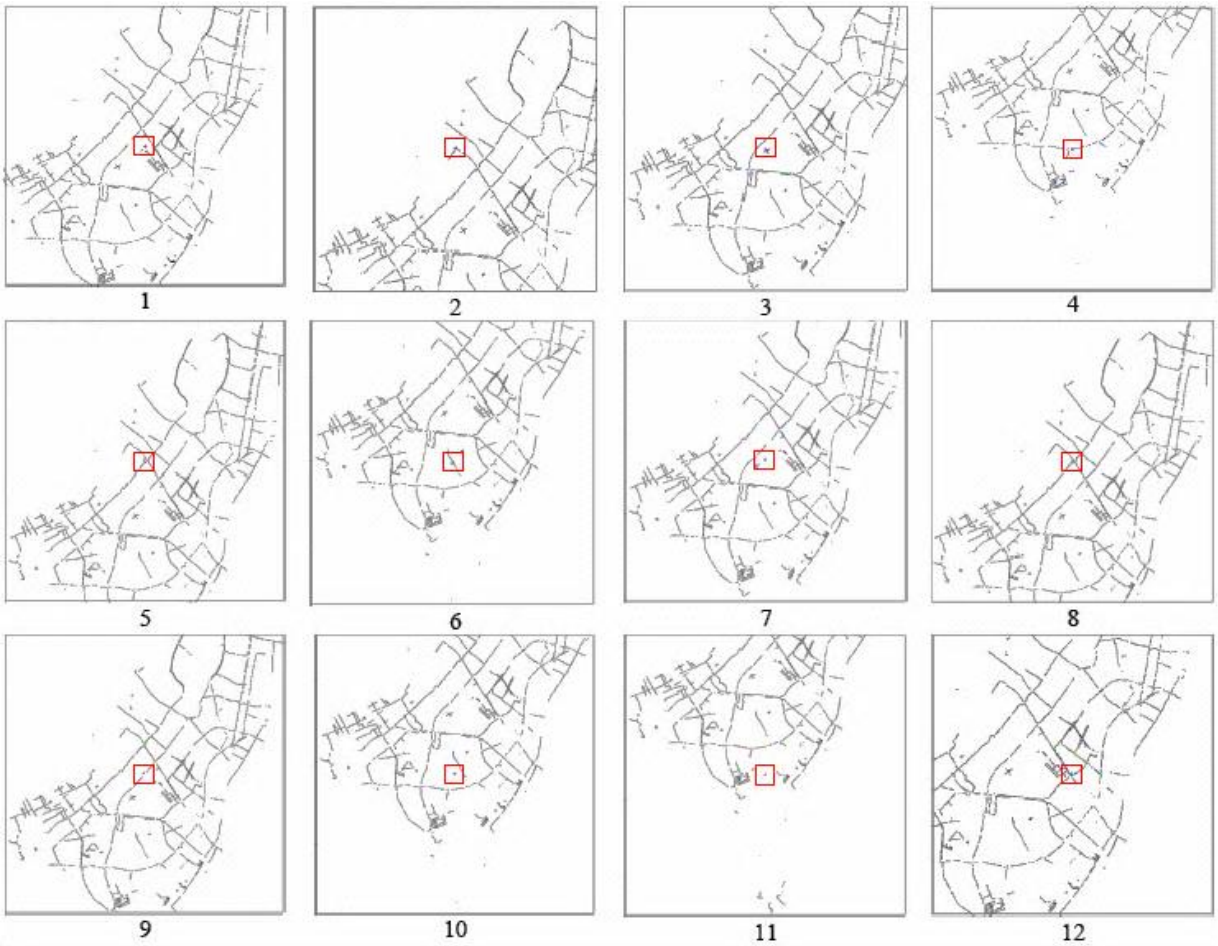


Figura 3. Imágenes de los espacios muestreados para el cálculo de la densidad para la cicloruta de Bogotá con *Fractalyse.* Los recuadros del centro de las imágenes muestra la variación del baricentro desde el cual se realizaron los análisis del radio de masa para calcular la densidad desde diferentes puntos lo cual deviene en diferentes morfologías como se puede observar.

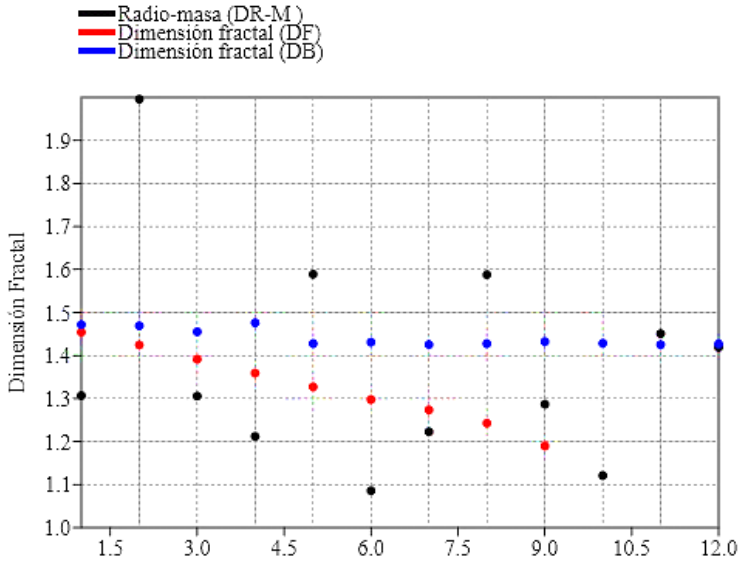


Figura 4. Comparativo de la D_B, D_F y $D_{R\text{-}M}$. Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 1 se ilustra la primera medición la cual arrojó como resultado un rango de D_B = 1,4415, donde se obtuvo una ley de potencia de la D_B, tipo de distribución que se encuentra en muchos otros fenómenos de la naturaleza (Dauphiné, 2012). Estas estimaciones fueron

corroboradas por una segunda medición de la dimensión fractal D_F = [entre] 1,4542 y 1,1897 presentada en la tabla 2, lo cual evidencia una complejidad aún mayor de lo que indica la primera estimación ya que el rango de mediciones se amplió en un sentido descendente, como se puede observar en la figura 2.

En la tabla 3 se presenta la tercera estrategia empleada radio de masa o $D_{R\text{-}M,}$ la cual es comprendida como la densidad de la ciclorruta estudiada. Este indicador presenta un abordaje mucho más difícil de interpretar ya que su implementación intentó analizar las diferentes posibilidades que el escaneo de tipo cuadrático de la imagen permite, no obstante los valores de correlación se acercan a 1 manteniéndose en 0,99 en la mayoría de los casos, lo cual satisface estadísticamente su aplicación, según el contexto que nos ocupa y la herramienta usada (Thomas et al., 2007), tal como se presenta en la figura 3. La figura 3 también presenta una muestra representativa de la densidad del objeto estudiado y su poca uniformidad. Recordemos que las estimaciones fractales se ubican en el contexto de la evolución del objeto estudiado. Sabemos que modificar la naturaleza fractal de un objeto urbano –tejidos, conglomerados y *sprawl* o dispersión– se posibilita a mediano o largo plazo.

La cuenta de caja media de la dimensión fractal (D_B) es la base de los datos mediante la cual la dimensión fractal promediada se establece sobre todas las ubicaciones. El error estándar (*SE*) se establece para la línea de regresión, y es una prueba de la validez de aplicación, desde la cual el D_B es calculado, y la correlación (r^2) es el valor para la regresión lineal que muestra la relación entre el registro de conteo y el tamaño seleccionado en el procedimiento, lo cual a su vez es una prueba de la línea de regresión. Estrictamente hablando, entre un valor de 1.0 este indicador muestra una correlación perfecta en los datos (Karperien & Jelinek, 2016).

Una comparación general de las tres mediciones presenta el resumen del examen comparativo entre los tres cómputos realizados. Se puede observar como los indicadores de fractalidad se mantienen en las dos estrategias implementadas, pero en el caso del análisis de densidad se presenta una clara independencia con relación a la fractalidad registrada. Como explica Frankhauser (2015, p. 16); “la densidad es constante cuando las partes constituyentes de una estructura, en nuestro caso, los edificios (o vías) se distribuyen uniformemente en el espacio, lo que no parece sostener para patrones urbanos.” Quizá la razón se obtenga desde una explicación geométrica, ya que la irregularidad y complejidad de las estructuras urbanas se definen por no tener formas lizas, y aunque tengan limites definidos, estos límites no son uniformes. No obstante, muestran crecimientos y sangrías de varios tamaños en su uniformidad, lo cual afecta –en consecuencia– la variación de su densidad. En nuestro caso, la falta de una uniformidad constante presenta efectos negativos en el transporte de la ciclorruta abordada. Estos efectos, pueden ser falta de conectividad en la red ciclovíal o áreas con mayores desconexiones, como en evidencia ocurre (ver figuras 5 y 6).

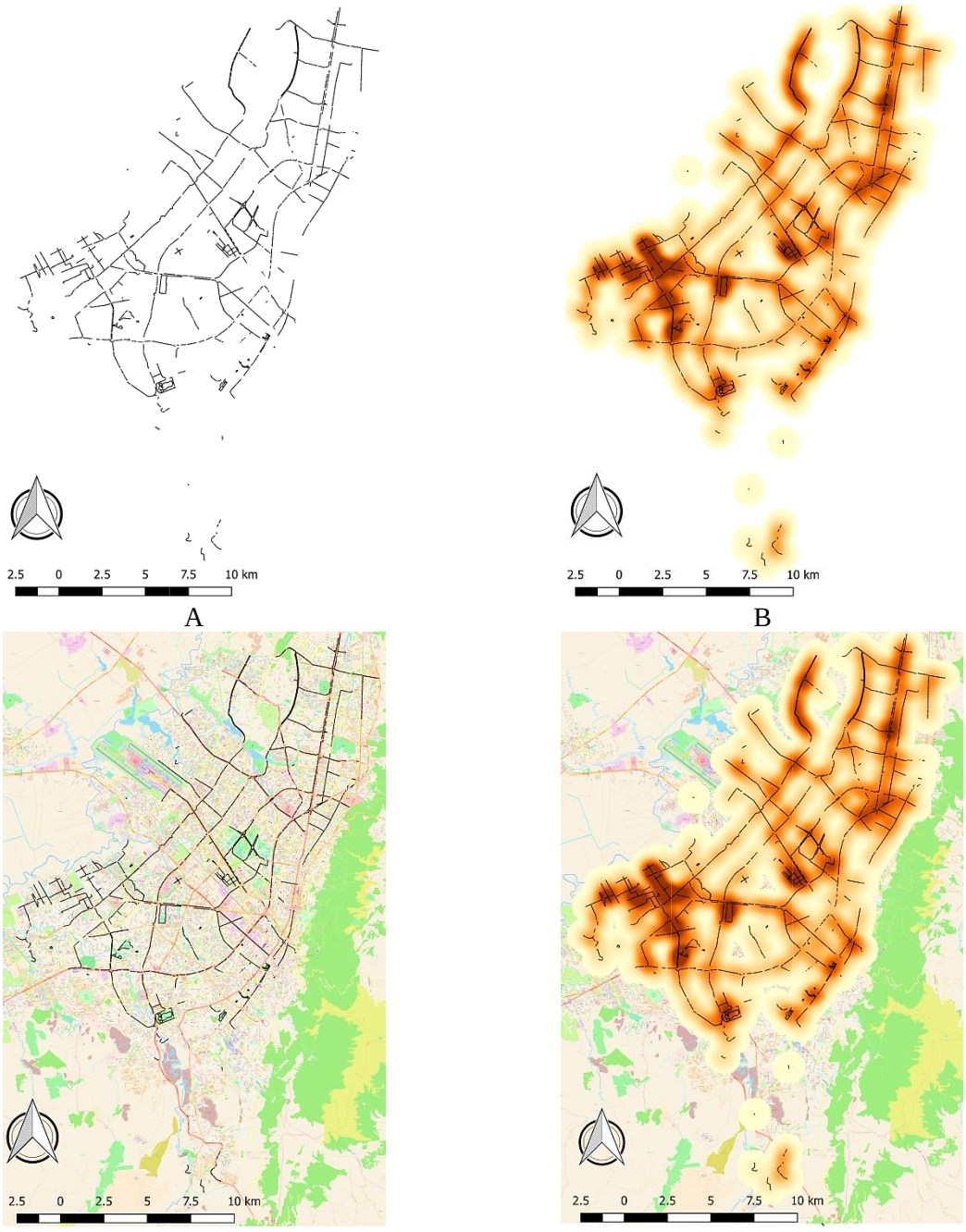


Figura 5. A. Ciclorruta de Bogotá. B. Densidad de Kernel (patrones de distribución). C. imagen de la ciudad de Bogotá y su ciclorruta. D. Densidad de Kernel en el contexto de la ciudad de Bogotá. Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones y recomendaciones

La ciclorruta bogotana exhibe una estructura fractal caracterizada por una dimensión fractal en un rango de D_B = 1,4415, corroborada con otro valor cercano de D_F = [entre] 1,4723 y 1,2214 (baja densidad en la red de la ciclorruta), si se compara con un objeto de naturaleza similar como la red de autobuses de una ciudad la cual llega a un máximo de D = 1.7 (Pavón-Domínguez et al., 2017, p. 236).

Este espacio estudiado presenta como característica una red a la que podemos denominar desconectada o semi-conectada, por ello su D_B indica un bajo nivel de complejidad. Por

complejidad nos referimos a la estructura irregular y morfología de la red de la ciclorruta en tanto atributo representado en imágenes desde una perspectiva aérea. Para esta interpretación nos apoyamos en Dauphiné (2012, p. 8), quien expresa que un principio administrativo en este sentido manifiesta que "una dimensión fractal mínima, crea redes más regulares, mientras que el principio de transporte es una fuente muy irregular de mallado urbano." Es decir, a mayor irregularidad o D_B de un objeto espacial –como el estudiado aquí– en términos morfológicos existe una mayor cohesión *conectividad*. Las implicaciones de esta perspectivas se perciben casi obvias; mejores posibilidades de recorridos de los flujos que circulan, mayor distribución de las vías espaciales, recorridos más eficientes, entre otras consecuencias.[6]

La desconexión de la ruta se presenta dramática entre los puntos 24130336 (Carrera 16A con Calle 62, localidad Ciudad Bolívar) y 34011431 (Calle 31 Sur con Carrera 5ª, localidad San Cristóbal) con la localidad de Usme punto 24132027 (Av. Boyacá con carrera 4ta] en adelante), debido a que si consideramos este sistema como proyectos sostenibles tales desconexiones abismales presentan una dificultad sustancial para los ciclistas de la zona sur de Bogotá tal como se demuestra en la figura 6.[7]

Una de las recomendaciones realizadas por Ríos Flores et al. (2015, p. 7) coincide con los resultados propuestos en este estudio, ya que se debe velar por la: "Continuidad: evaluar la conectividad de las rutas para los ciclistas y qué tan directas son en cuanto al origen y destino del viaje". La morfología de la ciclorruta presenta diversos retos como la ampliación de sus conexiones, esto es un requisito para cumplir las características formales de una red compleja, tal como los sistemas de transporte contemporáneos (Pavón-Domínguez et al., 2017) experimentan en su morfología evolucionada.

En el contexto que nos ocupa es necesario recordar que los indicadores y resultados obtenidos del proceso adelantado indican la naturaleza discontinua del tejido urbano bogotano y demás urbes, contienen niveles de complejidad, la cual se comprende a través de valores uniformes en distintos rangos, sobre un fenómeno que se presenta libre de escala, a propósito de una geografía urbana ya consagrada, aunque igualmente inacabada (Dauphiné 2012). En tanto indicador, las estimaciones fractales son perspectivas que comprenden el estudio de señales que se tornan complejas e intratables en muchos respectos, en nuestro caso la imagen de la ciclorruta estudiada se percibe como la representación de un espacio geográfico real con un patrón irregular, el cual presenta en términos de movilidad ciclística la necesidad de interconectarse en mayores niveles del caso urbano bogotano.

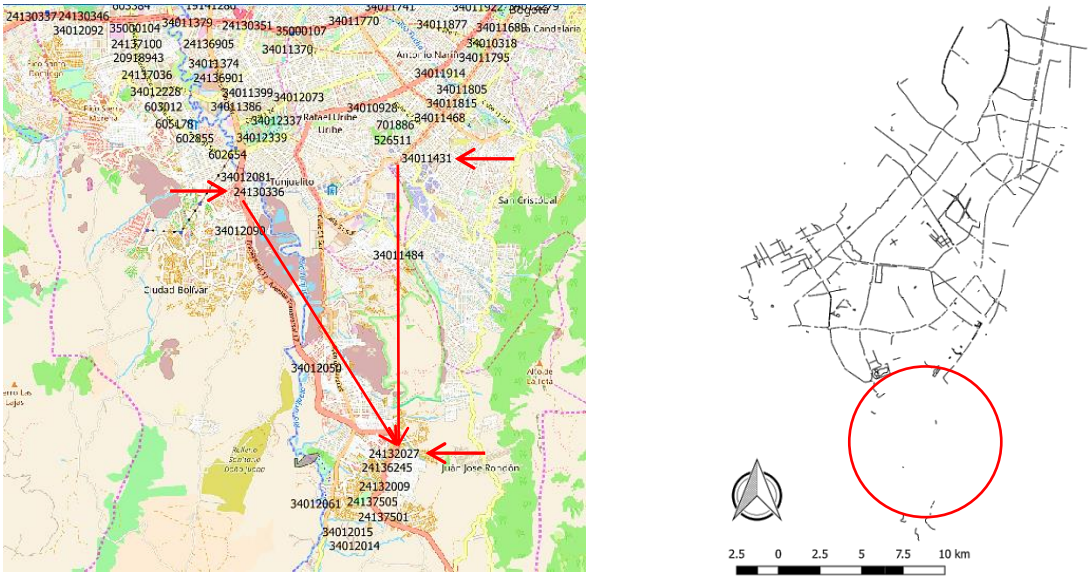
El análisis de las diversas estimaciones fractales continúa siendo aplicado en las diferentes rutinas investigativas dentro del campo de los estudios de morfología urbana (Batty 2012; Frankhauser 2015; Oliveira 2016). En este estudio intentamos evidenciar las relaciones de complejidad a través del análisis morfológico de un objeto de índole urbana, con la finalidad de comparar diferentes posibilidades de estudio de la ciclorruta bogotana, a través de indicadores como la dimensión fractal de sus patrones estructurales y la densidad del área construida de la infraestructura ciclista. Por consiguiente, la evidencia presentada en este espacio sugiere que los indicadores fractales resultado de nuestro análisis son un indicador de la intensidad espacial de la ciclorruta bogotana. Esto se sustenta en el hecho de no olvidar el principio de ordenamiento fractal que exhibe la naturaleza de las morfologías urbanas, tal como Batty y Longley (1994) nos lo enseñaron hace más de tres décadas.

---

[6] Por ejemplo, contrario a lo que se evidencia en la figura 6 A y B.

[7] Aunque desde hace un par de años se lanzó lo que se conoce como cicloinfraestructura 2.0, con la apertura de una serie de bicicarriles en diferentes calles de la ciudad para el tránsito de biciusuarios, este no parece ser una salida definitiva al problema de la movilidad ciclística de Bogotá, debido a la obvia peligrosidad que representa esta alternativa para los ciclistas.

Como limitaciones del presente estudio, se especifica que no se determinaron cuántos kilómetros del total de 392 km que la constituyen, pertenecen a una estructura verde o independiente, segregada o compartida, lo cual exige la realización de nuevas exploraciones en este sentido. Además, se sugiere tales realizaciones en un corto plazo con el propósito de identificar, intervenir e impactar positivamente para el beneficio de los usuarios de la ciclorruta a nivel de toma de decisiones.



A B

Figura 6. A. Zonas de mayor desconexión de la ciclorruta bogotana señaladas con las flechas rojas. B. Perspectiva total de la ciclorruta bogotana y zona relacionada. Fuente: Elaboración propia.

Referencias

Artículos en revistas científicas

Batty, M. (2012). "Building a Science of Cities". *Cities*, 29, S9–S16.

Benguigui, L. (1992). "The Fractal Dimension of Some Railway Networks." *Journal de Physique I, EDP Sciences*, 2(4), (pp. 385-388). Recuperado de: https://doi.org/10.1051/jp1:1992151

De Keersmaecker, M.L.; Frankhauser, P. y Thomas, I. (2003). "Using Fractal Dimensions for Characterizing Intra-Urban Diversity: The Example of Brussels". *Geographical Analysis*, 35, (pp. 310-328). Recuperado de: https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.2003.tb01117.x

Jevric, M., & Romanovich, M. (2016). "Fractal Dimensions of Urban Border as a Criterion for Space Management". *Procedia Engineering*, 165, 1478 -1482. Recuperado de: https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.882

Jiang S, y Liu D. (2012). "Box-counting Dimension of Fractal Urban Form: Stability Issues and

Measurement Design". *Int J Artif Life Res*, *3*(3), (pp. 521-525). Recuperado de: https://doi.org/10.4018/jalr.2012070104

Lagarias A. (2007). "Fractal Analysis of the Urbanization at the Outskirts of the City: Models, Measurement and Explanation". *Cybergeo: European Journal of Geography*. Recuperado de: http://journals.openedition.org/cybergeo/8902

Lu, Zhongming; Zhang, H; Southworth, F y Crittenden, J. (2016). "Fractal Dimensions of Metropolitan Area Road Networks and The Impacts on the Urban Built Environment".

Ecological Indicators, (70), (pp. 285–296). Recuperado de: https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.06.016

Pavón-Domínguez, P.; Ariza-Villaverde, A. B.; Rincón-Casado et al. (2017). "Fractal and Multifractal Characterization of the Scaling Geometry of an Urban Bus-transport Network". *Computers, Environment and Urban Systems*, 64, (pp. 229-238). Recuperado de: https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2017.03.003

Thomas, I.; Frankhauser, P. y De Keersmaecker, M-L. (2007). "Fractal Dimension Versus Density of the Built-up Surfaces in the Periphery of Brussels". *Pap Reg Sci*, *86*(2), (pp. 287-307).

Thomas, I.; Frankhauser, P. y Badariotti, D. (2012). "Comparing the Fractality of European Urban Neighbourhoods: Do National Contexts Matter?". *J Geogr Syst*, 14, (pp. 189-208).

Tomankova, K.; Jerabkova, P.; Zmeskal, O. et al. (2006). "Use of the Image Analysis to Study Growth and Division of Yeast Cells". *Journal of Imaging Science and Technology*, *50*(6), (pp. 583-589). Recuperado de: https://doi.org/10.2352/J.ImagingSci.Technol.(2006)50:6(583)

Turing, A. M. (1952). "The Chemical Basis of Morphogenesis". *Philos. Trans. Royal Soc. Lond. Ser. B Biol. Sci*., 237, (pp. 37-72).

Zhou1, Z. y J. Ma (2014). "Study of fractal structure characteristics of urban system in Northern Shaanxi". *Applied Mechanics and Materials*, 507, (pp. 609-614). https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.507.609

Libros

Albeverio S.; Andrey, D.; Giordano, P. y Vancheri, A. (Eds.). (2008). *The Dynamics of Complex Urban Systems: an Interdisciplinary Approach*. Heidelberg: Physica-Verlag.

Batty, M. & Longley, P. A. (1994). *Fractal Cities: A Geometry of Form and Function*. San Diego, CA: Academic Press.

Bovill, C. (1996). *Fractal Geometry in Architecture and Design*. A.G, Boston: Birkhauser Verlag.

Dauphiné, A. (2012). *Fractal geography*. Londres, ISTE.

Doursat, R.; Sayama, H. y Michel, O. (2012). *Morphogenetic Engineering: Toward Programmable Complex Systems*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.

Johnson, S. (2003). *Sistemas emergentes o qué tienen en común hormigas neuronas, ciudades y software*. México D. F.: Turner, Fondo de Cultura Económica.

Mandelbrot, B. (1977). *Fractals, Form, Chance and Dimension*. San Francisco: Freeman.

Oliveira, V. (2016). *Urban Morphology. An Introduction to the Study of the Physical Form of Cities*. Cham: Springer.

Suárez Lastra, M.; Galindo-Pérez, C. y Murata, M. (2016). *Bicicletas para la ciudad. Una propuesta metodológica para el diagnóstico y la planeación de infraestructura ciclista*. México D. F.: UNAM, Instituto de Geografía.

Capítulo en un libro o documento

Batty, M. (2009). Cities as Complex Systems: Scaling, Interactions, Networks, Dynamics And Urban Morphologies. En: Meyers R. (Ed.). *Encyclopedia of complexity and systems science. Vol. 1* (pp. 1041–1071). Berlin, DE: Springer.

Frankhauser P. (2008). "Fractal Geometry for Measuring and Modelling Urban Patterns". En:

Albeverio S., D. Andrey, P. Giordano y A. Vancheri (Eds.), *The Dynamics of Complex Urban Systems: An Interdisciplinary Approach* (pp. 213–243). Heidelberg: Physica-Verlag.

Frankhauser, P. (2015). "From Fractal Urban Pattern Analysis to Fractal Urban Planning Concepts". En: Helbich M., Jokar Arsanjani J. y Leitner M. (Eds.) (2015). *Computational Approaches for Urban Environments*. Cham: Springer.

Karperien, A., y Jelinek, H. (2016). "Box-Counting Fractal Analysis: A Primer for the Clinician". En: Di Ieva, Antonio (2016). *The fractal geometry of the brain* (pp. 13-45). Nueva York: Springer Science+Business Media.

Documentos y reportes técnicos de Internet, con fecha

Ríos Flores, R. A.; Taddia, A. P.; Pardo, C. F., y Lleras, N. (2015). *Ciclo-inclusión en América Latina y el Caribe: Guía para impulsar el uso de la bicicleta. Banco Interamericano de Desarrollo*. Consultado el 15 de febrero de 2018. Recuperado de https://publications.iadb.org/handle/11319/6808?locale-attribute=es