

Recibido: 25.02.2025 • Aceptado: 30.04.2026

Palabras clave: ciudades fractales, sustentabilidad, planificación urbana, autosimilitud, sistemas complejos.

Ciudades fractales en la sustentabilidad

EDUARDO JIMÉNEZ LÓPEZ

ejimenezl@uaemex.mx

CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS AVANZADOS DE LA POBLACIÓN, UAEM

RICARDO ELIU LOZOYA PONCE

ricardo.lp@chihuahua.tecnm.mx

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO - CAMPUS CHIHUAHUA, CHIHUAHUA

LUIS JAVIER ONTAÑÓN GARCÍA PIMENTEL

luis.ontanon@uaslp.mx

COORDINACIÓN ACADÉMICA REGIÓN ALTIPLANO OESTE, UASLP

La geometría fractal, desarrollada por Benoît Mandelbrot, describe patrones naturales autosimilares, como árboles o montañas, donde cada parte refleja la estructura del todo. Esta teoría, aplicada a la planificación urbana, propone diseñar “ciudades fractales” para alcanzar la sustentabilidad. Estas ciudades integran cuatro pilares: ambiental, económico, social y cultural, equilibrando recursos y equidad intergeneracional. Su diseño sigue principios como autoorganización, diversidad y reflexividad, adaptándose dinámicamente a las necesidades urbanas. Ejemplos como Singapur muestran estructuras en anillo que equilibran espacios construidos y naturales, optimizando el transporte y reduciendo el impacto ambiental. Las ciudades fractales mejoran la eficiencia energética, resuelven problemas de vivienda y transporte, y promueven la interdisciplinaria entre academia e industria. Aunque desafían los modelos urbanos tradicionales, ofrecen soluciones innovadoras ante el crecimiento poblacional y la crisis climática, al integrar complejidad natural en entornos urbanos.

En el siglo pasado, un matemático llamado Benoît Mandelbrot menciona que “las formas que nos rodean por la naturaleza generalmente no están regidas por una geometría euclidiana”, por lo cual nombró una nueva geometría: El fractal (Mandelbrot 2004). El descubrimiento y desarrollo de esta teoría matemática despertó un gran interés por su originalidad, ya que parecía alejado de la percepción común de los seres humanos. Con sus fórmulas se pudieron modelar paisajes y entornos naturales como nubes, ríos, montañas, límites de países, distribución y tamaño de estrellas de las galaxias, entre otros.

Se convirtió en una teoría fundamental en la actividad científica, al permitir el uso de los fractales para modelar

fenómenos que, de otro modo, serían enormemente complejos. Mediante términos matemáticos relativamente simples, ajustados a las condiciones concretas, es posible describir sistemas de alta complejidad. Con este descubrimiento se constató una relación oculta entre los elementos de la naturaleza que comparten ciertas fórmulas conocidas, como el llamado conjunto de Cantor. Este describe conjuntos de líneas de longitud de uno, en los cuales, en cada iteración se elimina sólo un tercio de la línea en su parte central. En la figura 1 se muestran seis iteraciones verticales del conjunto de Cantor, donde cada nivel divide los segmentos en tres partes y elimina el tercio central. La autosimilitud, (segmentos que se duplican y longitudes que decrecen exponencialmente) ilustra cómo reglas simples generan complejidad.

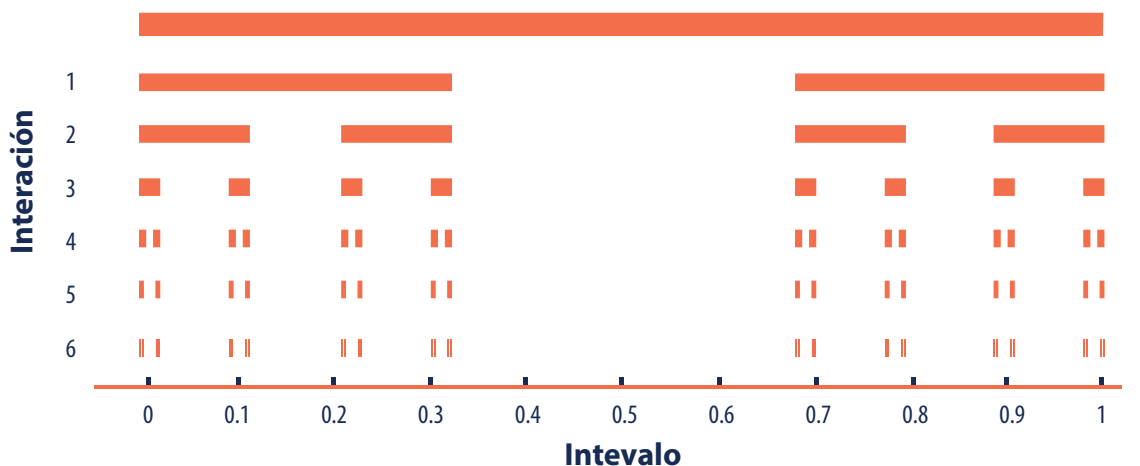


Figura 1. Conjunto de Cantor fractal con seis iteraciones



Imagen 1.
Fractales en la naturaleza

La geometría fractal se basa en irregularidades que, a pesar de su complejidad, guardan relación entre sí y generan formas similares. La clave de esta geometría es la auto semejanza que describe muchos aspectos de la realidad e intenta concentrar la atención en ciertos patrones de comportamiento.

Fractales: ¿Qué son?

La palabra "fractal" implica que cada parte contiene una estructura similar al todo. Un ejemplo claro de esto es un árbol, cuyas ramas replican su forma general. Estos patrones tienden a repetirse indefinidamente, aunque con variaciones. La belleza fractal radica en su irregularidad, que puede terminar siendo visualmente extraña para las personas que están acostumbradas a formas geométricas convencionales. Las deformaciones fractales generan el vértigo estético asociado a la proximidad de lo real (imagen 1).

El fractal puede definirse como patrones naturales basados en el entrelazamiento aparentemente desordenado de ciertas estructuras. Es importante mencionar que la integración del concepto de fractalidad con el de sustentabilidad se refiere a las propiedades que los rasgos físicos de la figura presentan.

Fractalidad urbana

A nivel urbano, los fractales se manifiestan en formas presentes en edificios, en conjuntos arquitectónicos, en las tramas urbanas y en el crecimiento y evolución de las ciudades a lo largo del tiempo. Una propiedad fractal clave es la autosimilitud, según la cual los patrones se asemejan al original tras ciertas transformaciones. Estas propiedades también se manifiestan en formas más simples, como líneas rectas o círculos, en condiciones ambientales limitadas.

Las ciudades fractales han sido propuestas por diversos teóricos (Batty & Longley 1994). Se trata de entornos contruidos en los que las estructuras presentan patrones geométricos no convencionales, es decir, alejados de la escala arquitectónica habitual. Un ejemplo de esto se aprecia en el hotel Morpheus, en la ciudad de Macao, (imagen 2).

Los fractales estudian la dimensión, la forma, la posición, la dispersión y la ubicación de los objetos, así como su relación con el espacio donde se encuentran. En el análisis espacial se realizan estudios detallados geo-socioestadísticos en donde se propone la implicación para modelar fenómenos urbanos y su relación con las

ciudades fractales para la sustentabilidad (Garrocho *et al.*, 2021).

En la toma de decisiones sobre el desarrollo urbano, es crucial considerar la sustentabilidad, basada en cuatro pilares fundamentales: ambiental, económico, social y cultural. Estos se encuentran en equilibrio constante dentro de un complejo engranaje que interactúa en el concepto original. Alcanzar dicho equilibrio beneficia tanto a las generaciones presentes como a las futuras, al garantizar la conservación de los recursos que el planeta pone a disposición del ser humano, optimizando su aprovechamiento y velando por la justicia y la equidad entre todas las partes.

Son numerosos los beneficios asociados a las ciudades fractales. Su aplicación favorece formas urbanas más libres y orgánicas, alejadas de la planificación mecanicista tradicional, caracterizada por espacios monótonos y rígidos. En cambio, se promueve la simulación de paisajes completos y dinámicos. En las obras civiles, por ejemplo, los estudios de tráfico sensibles a las leyes fractales podrían mejorar la estética, el confort personal y la conducción, mientras permiten ahorros significativos en energía en el terreno.

Los problemas relacionados con la vivienda, los servicios y la infraestructura de transporte han impulsado el desarrollo de las ciudades fractales. Los barrios fractales buscan responder a estas problemáticas mediante los complejos habitacionales funcionales a las necesidades ciudadanas.

Considerar una ciudad fractal permite identificar y evaluar sus necesidades, como la conectividad, las jerarquías y los usos. Singapur es una ciudad sostenible que ha logrado este objetivo a través de la gestión del agua, la protección de la biodiversidad, la instalación de sensores para monitorear el consumo energético y la generación de residuos. La geometría fractal en ciudades permite la descentralización de la urbanización y la equidad en el acceso a servicios, áreas verdes, transporte, aire limpio y agua.

A medida que la población urbana aumenta, también lo hacen los problemas asociados, especialmente ligados al transporte, la energía y los residuos, entre otros. Por otra parte, crece la preocupación mundial por la manufactura sustentable en el ámbito de la salud humana y la salud global del ambiente. Entendemos que las ciudades fractales pueden constituir un medio ambiente propicio para el desarrollo de más estudios que permitan



Imagen 2.

a) Hotel Morpheus diseñado por los arquitectos Zaha Hadid. Imagen de Dllu. b) Gardens by the bay, Singapur. c) Estructura fractal en edificio en Singapur.



EDUARDO JIMÉNEZ LÓPEZ


Maestro y doctor en Ciencias Aplicadas por la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, además de Ingeniero Electrónico por la Facultad de Ciencias de misma institución. Cuenta con reconocimiento como Investigador Nacional Nivel I en el Sistema Nacional de Investigadores. Actualmente se desempeña como Profesor-Investigador en la Universidad Autónoma del Estado de México en el Centro de Investigación y Estudios Avanzados de la Población (CIEAP). Trabaja actualmente en el proyecto crecimiento de ciudades con modelos matemáticos y análisis espacio-temporal de envejecimiento en México.

entender las variables que intervienen. La industria aplicará este conocimiento, cuando sea posible, al diseño de procesos y servicios asociados a la sustentabilidad a través del diseño de sistemas e innovación, contribuyendo a la solución de problemas tales como la ubicación de hospitales y del tipo de actividades que se asientan en barrios específicos, la delimitación de polígonos industriales, la evaluación de programas de mejoramiento, la densificación e incorporación de servicios y comercio en núcleos o puntos de actividad y la planificación en general a través de la integración de factores pobremente analizados e inserción de la sustentabilidad en la planificación para desarrollar la forma del transporte, establecer y localizar nuevos servicios y disminuir el consumo de energía y la generación de residuos.

Las ciudades fractales tienen un gran potencial de aplicación en diversas áreas, como el estudio del comportamiento humano, la planificación urbana, el diseño de organizaciones agrícolas y empresariales, la arqueología, la ecología y la arquitectura, desde sus dimensiones constructiva, funcional y estructural. La tendencia de la planificación de ciudades es avanzar hacia campos emergentes; las ciudades fractales poseen un importante potencial en la sustentabilidad, en el desarrollo, en el incremento de la interdisciplina entre la academia y núcleos de vanguardia en las industrias a las que su enfoque pueda ofrecerle ventajas competitivas (Figura 3b-c).

Conclusiones

La geometría fractal ofrece al urbanismo un marco operativo con base cuantitativa (variables como la dimensión *box-counting* permiten evaluar la morfología urbana más allá de los indicadores euclidianos convencionales, tal como respaldan Batty & Longley [1994] y Zhang *et al.* [2024]) y aporta a la sustentabilidad algo que los cuatro pilares convencionales no capturan de forma aislada: la

capacidad de escalar soluciones eficientemente desde el barrio hasta la metrópolis. Sin embargo, su aplicación enfrenta dos limitaciones concretas: la escasez de datos urbanos longitudinales para validar los modelos a escala, y los marcos normativos latinoamericanos contruidos sobre lógicas de zonificación regular que dificultan su adopción institucional. Avanzar en este campo exige orientar la investigación hacia la medición fractal en ciudades con crecimiento informal, las simulaciones con autómatas celulares que integren variables socioeconómicas y morfológicas, y la conformación de equipos interdisciplinarios, impulsados desde la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, capaces de traducir estos modelos en indicadores operativos para la planeación urbana real. 

Agradecimientos

L.J. Ontañón-García agradece al Consejo Potosino de Ciencia y Tecnología (COPCYT) por el apoyo otorgado en el proyecto Fideicomiso 23871 de la Convocatoria 2023-01.

Referencias bibliográficas:

- Mandelbrot, B. B., Evertsz, C. J., & Gutzwiller, M. C. (2004). *Fractals and chaos: the Mandelbrot set and beyond* (Vol. 3). New York: Springer.
- Batty, M., & Longley, P. A. (1994). *Fractal cities: a geometry of form and function*. Academic press.
- Zhang, C., Ping, X., Fan, Q., & Li, C. (2024). Measurement of 2D and 3D Fractal Features of Urban Morphology from an Architectural View and Its Influencing Factors. *Fractal and Fractional*, 8(3), 138.
- Garrocho, C., Chávez, T., & Jiménez, E. (2021). Autómata Celular Metro-NASZ: laboratorio experimental de expansión urbana. CONAPO, *La situación demográfica de México*, 149-175.