LOS FRACTALES Y EL DISEÑO EN LAS CONSTRUCCIONES

Fractals and design in constructions

RUFINO ITURRIAGA[1] Y CARINA JOVANOVICH[2]

Aún no lo sabemos todo acerca de los fractales;
tampoco el hombre ha terminado de descubrirse.

Resumen

En las décadas más recientes, la geometría fractal se ha sumado a la geometría clásica de Euclides de Alejandría, siendo considerada por arquitectos de todo el mundo en sus propuestas y creaciones.

En este trabajo se busca establecer una relación entre la geometría fractal y el diseño arquitectónico de una manera informativa, sin detalles matemáticos más que los puntos esenciales, necesarios para su entendimiento y correcta interpretación.

Palabras Clave: Fractales, Arquitectura, Geometría.

Abstract

In recent decades, fractal geometry has joined classical geometry of Euclid of Alexandria, being considered by architects from around the world in their proposals and creations.

This paper seeks to establish a relationship between fractal geometry and architectural design of a informational way, without mathematical details, only the essentials points necessary for correct understanding and interpretation.

Key Words: Fractals, Architecture, Geometry.

[1] Ingeniero Electromecánico, Facultad de Arquitectura, UNNE, Resistencia, Chaco, Argentina. rufinoit@yahoo.com.ar.

[2] Licenciada en Tecnología Educativa, Especialista en Investigación Educativa, Facultad de Arquitectura, UNNE, Resistencia, Chaco, Argentina. carijovanovich@yahoo.com.ar

Concepto y Características.

El término fractal es un vocablo derivado del latín, *fractus* (participio pasado de frangere), que significa quebrado o fracturado y se lo utiliza para designar a objetos "semigeométricos" cuya estructura básica se repite a diferentes escalas. No es sencillo encontrar una definición rigurosa para los fractales, de hecho, no existe aún una definición universalmente aceptada por el mundo matemático.

En el capítulo 5 de su obra *La Geometría Fractal de la Naturaleza*, el célebre matemático Benoit Mandelbrot[3] trata un ejemplo sobre la longitud de la costa de Gran Bretaña[4], en la cual, a través de un relato anecdótico brinda una impresión sencilla para obtener un claro concepto acerca de los fractales. Al respecto de la longitud de la costa, el autor Clifford A. Pickover establece:

> Si se intentara medir una costa o límite entre dos naciones, el valor de esta medición dependería de la longitud de la vara de medir utilizada. Conforme la vara de medida disminuyera en longitud, la medida sería más sensible a las curvas cada vez más pequeñas del contorno y, en principio, la longitud de la costa tendería a infinito conforme la longitud de la vara se acercara a cero. El matemático británico Lewis Richardson consideró este fenómeno en su intento de establecer una correlación entre la aparición de guerras y la frontera que separa dos o más naciones (llegó a la conclusión de que el número de guerras de un país era proporcional al número de países con los que limita). A partir del trabajo de Richardson, el matemático franco-estadounidense Benoit Mandelbrot, añadió y sugirió que la relación entre la longitud de la vara de medir y la longitud total aparente de una costa podía expresarse a través del parámetro D, la dimensión fractal."[5]

---

[3] Benoit B. Mandelbrot nació en 1924 en Varsovia, Polonia, en el seno de una familia judía y fue educado bajo la tutela de su tío, Szolem Mandelbrot, reconocido profesor de Matemática en el Colegio de Francia, el mismo que le recomendó que leyera la tesis de doctorado que Gaston Julia (1883-1978) había publicado en 1918 sobre iteración de funciones racionales. En 1977, durante su trabajo en el Laboratorio de IBM de Yorktown Heigths, New York, Mandelbrot pudo demostrar como el trabajo de Julia constituye la fuente de los fractales más hermosos conocidos hasta el momento. En 1982 publicó su libro *Fractal Geometry of Nature*, en el que explicaba sus investigaciones en este campo. Entre 1985 y 1991 recibió numerosas distinciones, entre las que se destacan el premio *Barnard Medal for Meritorious Service to Science*, la *Franklin Medal*, el premio *Alexander von Humboldt*, la *Medalla Steindal* y la *Medalla Nevada*. En el año 2004 su obra *Fractales y Finanzas* fue elegida como mejor libro de economía del año por la versión alemana del Financial Times. Fue profesor en la Universidad de Harvard, Yale, el Colegio Albert Einstein de Medicina y otros. Falleció en octubre de 2010 en Cambridge, Massachusetts, Estados Unidos.

[4] Ideas expuestas originalmente en su trabajo "How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension", *Science*, 156 (1967), pp. 636-638.

[5] Clifford A. Pickover (2011) "La paradoja de la línea de costa" en: *El libro de las Matemáticas*. Librero b.v. Holanda, p. 402.

En el intento de una definición, hay que considerar dos propiedades que los objetos presentan: la autosimilitud y la "dimensión extraña".

El término autosimilitud (que puede ser entendido también como autosemejanza) está relacionado a la propiedad de un objeto de presentar en sus partes la misma forma o estructura que el todo, aunque pueden encontrarse a diferentes escalas y ligeramente deformadas en algunos casos. Se mencionarán tres tipos diferentes de autosimilitud:

- *Autosimilitud exacta*: es el tipo más restrictivo y exige que el fractal parezca idéntico a diferentes escalas (sistemas de funciones iteradas). Ejemplo: conjunto de Cantor, triángulo de Sierpinski, copo de nieve de Von Koch y otros.
- *Cuasiautosimilitud*: exige que el fractal parezca aproximadamente idéntico a diferentes escalas (fractales definidos por relaciones de recurrencia). Ejemplo: conjunto de Julia, conjunto de Mandelbrot y otros.
- *Autosimilitud estadística*: es el tipo más débil y exige que el fractal tenga medidas numéricas o estadísticas que se preserven con el cambio de escala (fractales aleatorios). Ejemplo: el vuelo de Levy, paisajes fractales, árboles brownianos y otros.

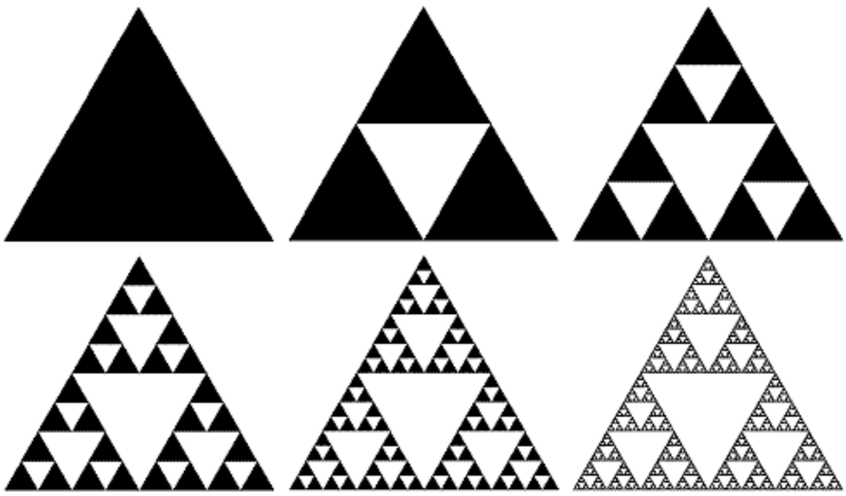


Figura 1: *El triángulo de Sierpinski. Secuencia de generación.*
Imagen: http://batchdrake.wordpress.com

Considérese en primer término un triángulo equilátero que no contenga "huecos" en su interior; entiéndase como tal un triángulo "lleno" (Figura 1). Si los puntos medios de cada uno de los lados de los triángulos son unidos por medio de segmentos, se notará que dentro del triángulo inicial quedan formados cuatro triángulos más pequeños, de los cuales se eliminará el del medio (el que está invertido respecto de los otros).

Si en cada uno de los tres triángulos llenos que han resultado del proceso descripto, se repite el procedimiento, se notará que resultan nueve triángulos más pequeños. Con una nueva iteración, el número de triángulos llenos llega a veintisiete y se puede seguir de la misma manera, obteniendo como resultado un número creciente de triángulos cada vez más pequeños. Nótese además que, por cada iteración que se efectúe aparecen diferentes tamaños en los triángulos vacíos. Está claro que el proceso es infinito, sin embargo a partir de las iteraciones de orden cuatro o cinco se puede tener una idea de cómo será la figura límite. Si se continúa iterando será difícil distinguir las diferencias a simple vista entre un paso y el siguiente. En el dibujo se pueden apreciar muchas copias de sí mismo en el interior, lo cual permite afirmar que se halla formado por copias de sí mismo que se encuentran a diferentes escalas y en ocasiones cambiadas de posición, dependiendo del orden de iteración que se represente. Este es el concepto de *autosimilitud*, la primera de las propiedades mencionadas. Es posible afirmar que se trata de una noción muy sencilla e intuitiva, pues seguramente todas las personas en algún momento la han percibido en diferentes contextos naturales, como nubes, olas, vegetales, etc[6].

El triángulo analizado se conoce con el nombre de triángulo de Sierpinski[7]. De manera similar se pueden estudiar otros fractales muy conocidos, el pentágono de Dürer, la alfombra de Sierpinski, el copo de nieve de Von Koch y muchos más, en todos ellos se percibe en mayor o menor grado que el todo es igual a sus partes, salvo un factor de escala.

Desde muy temprano en la educación matemática se aprende que un punto tiene dimensión 0, que una línea tiene dimensión 1, que las figuras planas tienen dimensión 2 y que las espaciales tienen dimensión 3[8]. Estas dimensiones que corresponden a números enteros y son invariantes ante homeomorfismos[9], son conocidos con el nombre de dimensión topológica y refiere precisamente al concepto habitual de dimensión que se tiene incorporado, pero la dimensión topológica no es la única que existe. Tomando un cuadrado, el mismo puede ser dividido en cuatro cuadrados congruentes y decir que el factor de ampliación es 2, o de manera similar, si se descompone en nueve triángulos congruentes

---

[6] Al respecto, Mandelbrot establece: "Un fractal es una clase especial de invariancia o simetría que relaciona un todo con sus partes: el todo puede descomponerse en partes que evocan el todo. Piénsese en una coliflor: cada racimo puede separarse y es, en sí mismo, una coliflor en miniatura. Los pintores, entrenados en observar la naturaleza de cerca, ya sabían esto sin esperar a que la ciencia se lo dijera", De Benoit Mandelbrot – Richard L. Hudson. (2006). *Fractales y Finanzas.* Barcelona (España). Editorial Tusquets, p. 140.

[7] Waclaw Sierpinski (1882id – 1969): matemático polonés nacido en Varsovia. Fue uno de los fundadores de la escuela matemática moderna polaca y contribuyó al progreso de la teoría de conjuntos y de la topología; favoreció la consolidación de los fundamentos lógicos de la matemática. Uno de los cráteres de la Luna lleva su nombre.

[8] Algunos autores afirman que el conjunto vacío tiene una dimensión igual a -1.

[9] Recuérdese que, si X e Y son espacios topológicos y f una función de X a Y, entonces f es un homeomorfismo si se cumple que: f es una biyección, f es continua y además la inversa de f es continua.

al cuadrado inicial, se dice que el factor de ampliación es 3. Como generalidad se puede expresar que el cuadrado se puede descomponer en n^2 copias de sí mismo. Si se hace un razonamiento análogo a partir de un cubo, el mismo se puede descomponer en n^3 partes iguales. Así, se puede generalizar la fórmula:

$$n^D = N$$

en la que:

$$D = \frac{\ln N}{\ln n}$$

N: número de copias semejantes a la figura original.
n: factor de ampliación que se debe aplicar para obtener la figura original.
D: dimensión fractal. La cual se conoce como dimensión fractal y que corresponde a una simplificación del concepto de dimensión que utilizó Haussdorf[10].

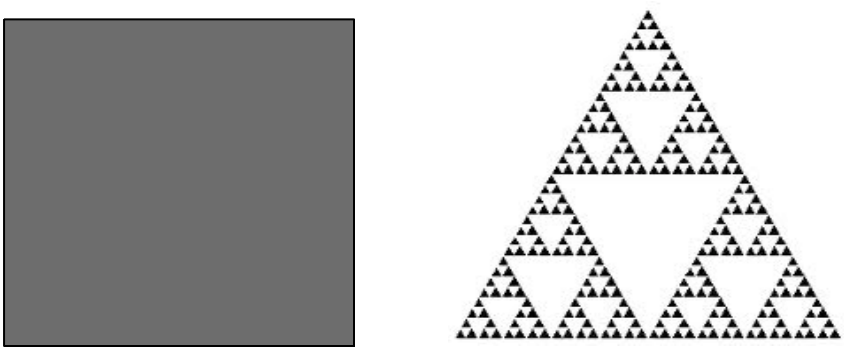
La definición de Mandelbrot: "un fractal es un conjunto cuya dimensión de Hausdorff es estrictamente mayor que su dimensión topológica" es ampliamente aceptada (Figura 2), sin embargo el mismo autor señaló que no resulta una definición lo suficientemente general ya que la misma presenta el inconveniente de excluir conjuntos que claramente debieran ser reconocidos como fractales.

Como generalidad se acuerda en no definir un fractal, aunque es posible enumerar sus propiedades características:

- Los fractales son demasiado irregulares para ser descriptos con la geometría tradicional de Euclides.
- Los fractales tienen una cierta forma de auto-semejanza, quizás aproximada o estadística.
- Por lo general, la dimensión fractal es mayor que la dimensión topológica.
- En muchos casos, el fractal se define en forma muy simple, por lo general, recursiva.

---

[10] Felix Hausdorff (1868-1942): matemático de origen judío, profesor en Universidad de Bonn y uno de los responsables de la fundación de la topología moderna, célebre por su trabajo en el análisis funcional y la teoría de los conjuntos. En 1918 introdujo la dimensión de Hausdorff que se utiliza para medir las dimensiones fraccionarias de los conjuntos fractales. En 1942, a punto de ser enviado a un campo de concentración nazi, se suicidó junto a su esposa. El día anterior, Hausdorff escribió a un amigo: "Perdónanos. Te deseamos a ti y a todos nuestros amigos mejores tiempos" Muchos de los enfoques utilizados para calcular la dimensión de Hausdorff en relación con conjuntos complicados, fueron formulados por el matemático ruso Abram Besicovitch (1891-1970), por lo cual a veces se utiliza el término "dimensión de Hausdorff-Besicovitch".



DT=2 ; DH=2 ; DH=DT DT=1 ; DH~2 ; DH>DT

Figura 2: *Comparación de dimensiones.*
Imagen: http://www.dma.fi.upm.es/sonia/practicas/clasics-I/sierpinski.html

Las aplicaciones de los fractales han crecido exponencialmente y se expandió a diferentes ramas de las artes y las ciencias. Existen teorías basadas en fractales que regulan el enorme tráfico de las comunicaciones, comprimen las señales de audio y vídeo, explican el crecimiento de tejidos biológicos, analizan el comportamiento de ondas sísmicas, movimientos de mercado, bursátiles y más. Son ampliamente conocidas las pinturas de fractales e incluso hay música surgida de ellos.

Todos los fractales tienen algo en común, ya que todos son el producto de la iteración, repetición, de un proceso geométrico elemental que da lugar a una estructura final de una complicación aparente extraordinaria. Utilizando algún software para la construcción de fractales, se llegará a la conclusión de que no existen programas que permitan una iteración infinita, lo cual grafica perfectamente lo que ocurre con los *fractales naturales*.

Existen en la naturaleza objetos que presentan características fractales. Si se toma una rama de algún árbol, se verá que la misma presenta una apariencia semejante a la del árbol y lo mismo se notará comparando las ramas más pequeñas, pero llegará un punto en el que el árbol no puede descomponerse más, es decir que no será un fractal perfecto (estos últimos son solamente teóricos). También los sistemas de ríos, arroyos y afluentes pueden verse como fractales de la naturaleza.

Fractales y diseño.

La utilización de los algoritmos como herramienta de diseño, permiten generar permutaciones infinitas, inviables a partir del enfoque manual, ya que los procesos son abordados con una escala y complejidad que brindan los beneficios de profundidad y amplitud. Estos proyectos tratan de explorar los algoritmos y la computación como una herramienta de diseño generativo, combinados a los actuales procesos de diseño produciendo una nueva e inusual forma arquitectónica, que nos atreveremos a denominar “Arquitectura Fractal". No obstante la reciente aparición referida, se pueden observar aplicaciones fractales en obras arquitectónicas construidas hace siglos.

La esponja de Menger también conocida como cubo de Menger (Figura 3), fue descripta por primera vez por el matemático austríaco Karl Menger[11], en el año 1926. Para efectuar la construcción del mismo, se parte desde un cubo lleno y se los divide en 27 cubos idénticos, que resultarán más pequeños lógicamente; luego se quitan el cubo central y los seis que comparten caras con él, de manera que quedan 20 cubos. Por cada iteración que del proceso mencionado el número de cubos aumentará en 20^n, de manera que rápidamente se llegará a un número muy alto.

La forma de este fractal hace pensar sin duda en el cubo mágico. La esponja de Menger muestra propiedades geométricas de gran interés, a medida que se aumentan las iteraciones la superficie aumenta hasta tender al infinito, al mismo tiempo que encierra un volumen que tiende a cero. Presenta una dimensión fractal entre un plano y un sólido de 2,73.

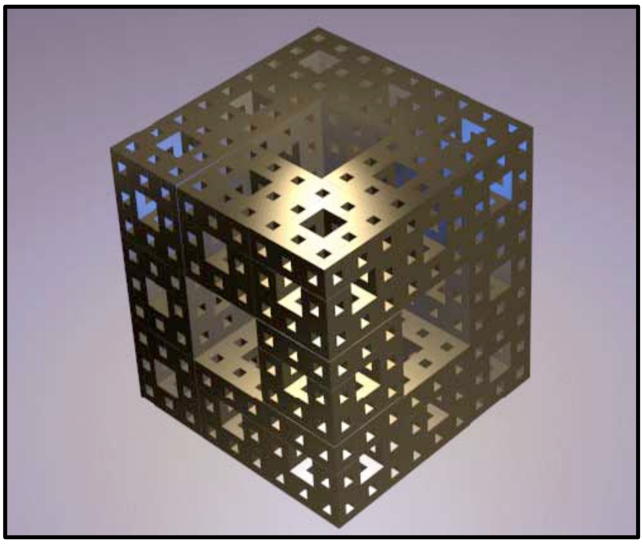


Figura 3: *La esponja de Menger.*
Imagen: http://www.ceticismoaberto.com/ciencia/2139/fractais-uma-nova-viso-da-natureza

En cada una de las caras del cubo de Menger quedará formada la alfombra de Sierpinsky (Figura 4), la cual se puede apreciar en la figura en sus primeros órdenes de iteración. Siguiendo la relación con la esponja de Menger se puede establecer que la alfombra tendrá una superficie que tiende a cero cuando se incrementen las iteraciones y una longitud que tiende a infinito. La misma resulta útil para el tratamiento de relaciones lleno-vacío dentro de la estructura general de las ciudades, morfologías básicas, patios de parcela y manzana, circulaciones interiores y aperturas de fachada o estructuras de máxima envergadura y mínimo peso. En cada una de las caras del cubo de Menger se podrá apreciar que queda determinada la alfombra de Sierpinski, la cual se muestra en la ilustración en sus primeros órdenes de iteración (Figura 4). Trazando un paralelismo con

[11] Karl Menger (Viena, Austria, 1902 – Chicago, EE.UU. 1985). Se doctoró en Matemática en la Universidad de Viena y debido a sus fuertes intereses en aspectos filosóficos, se unió al llamado círculo de Viena, integrado por filósofos lógico-empiristas. Su contribución matemática más popular es la esponja que lleva su nombre.

el cubo de Menger, se podrá notar que la alfombra tendrá una superficie que tiende a cero cuando se incrementen las iteraciones y una longitud tendiente a infinito.

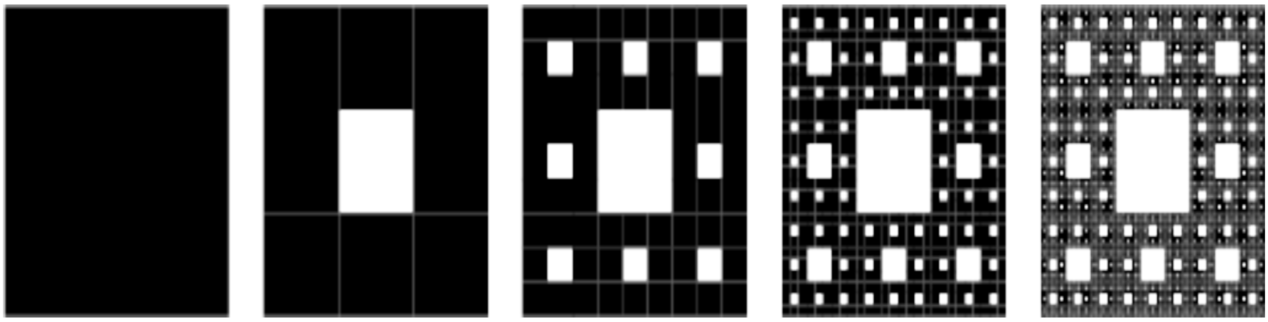


Figura 4: *Alfombra de Sierpinski hasta el cuarto orden de iteración.*
Imagen: http://personal.telefonica.terra.es/web/mundofractal.html

Dentro de la arquitectura, el cubo de Menger deja vislumbrar las relaciones lleno-vacío, de aplicación a la parte estructural y a los espacios como se puede notar en el proyecto que se muestra en la figura, que corresponde a una de las propuestas finalistas para el Centro de Artes Escénicos de Taipei (China)[12], la cual logró una mención especial aunque finalmente no fue la seleccionada para la construcción (Figura 5).

Figura 5: *Propuesta para el Centro de Artes Escénicos Taipei (China)*
Imagen: http://www.freakarq.es/esponja-menger-taipei-nl/

La obra, de la que se muestran figuras, fue presentada por el estudio NL Architects a través de sus responsables Pieter Bannenberg, Walter van Dijk y Kamiel Clase; se basa en un espacio combinado de escala urbana, que busca lograr un espacio verdaderamente público, definido por el mismo, para lo cual se apuesta a la perforación

[12] El principal requisito en el concurso del “Centro de Artes Escénicos” consistía en el diseño de un centro capaz de acoger exposiciones estándares y también eventos internacionales; además era el primer paso para impulsar a Taipei como la ciudad “Capital de las Artes”. Participaron los estudios más importantes del mundo: OMA, Zaha Hadid, Morphosis, NL Architects, SURV Associates, Jacob+Mc Farlane, MVRDV y otros.

del interior del edificio originando una estructura permeable para los peatones. El edificio logra identidad; la plaza interior es un espacio abierto que permite el fluir de la vida urbana en todas las direcciones a través del mismo, protegido de los agentes meteorológicos de manera parcial. Además, cualquier objetivo dentro del edificio se puede alcanzar mediante el uso de varios caminos alternativos, los cuales resultan interesantes para inducir al encuentro y la interacción social, contando con instalaciones de bares, pasillos, restaurantes, salas de música y otras.

Se puede hacer mención también del proyecto para la KT Corporation en la ciudad de Seúl, Corea del Sur, llevada a cabo por los estudios Daniel Libeskind + G.Lab* by Gansam Architects & Partners[13] en la que se podrá apreciar un novedoso sistemas de puertas open-flow e intercomunicación entre habitantes como también con los visitantes.

Otra obra para destacar es el Simmons Hall del Massachusetts Institute of Technology, diseñado por Stevens Holl, que según él mismo, el plan fue motivado, al menos en parte, por la esponja natural, la cual presenta una distribución fractal de agujeros, con una aparente sencillez y tiene al cubo como punto de partida (Figura 6).

Figura 6: *Simmons Hall, MIT, EE.UU.*
Imagen:http://eliinbar.files.wordpress.com/2012/08/simmons_hall_big.jpg

La multiplicidad de formas que surgen a partir de los fractales, como asimismo la belleza y el atractivo de las mismas hacen pensar en un espectro de posibilidades en el diseño más que amplio, aún cuando no se utilicen los algoritmos de generación como una herramienta matemática.

El árbol binario de Pitágoras en su forma equilibrada, permite pensar en la asignación de espacios que se van separando a partir de una clasificación de temas o subte-

[13] Proyecto de Arquitectura: Carla Swickerath (Studio Daniel Libeskind) + Chuloh Jung (G.Lab* by Gansam Architects & Partners). Equipo de diseño: Seungki Min, Byungdon Yoo, Roy Oei (Studio Daniel Libeskind) + Shinhui Won, Wookjin Chung, Sangsu Park, Sang-Hyun Son, Inkyung Han, Taewook Kang, Namhui Kim, Shinkyung Jo (G.Lab* by Gansam Architects & Partners)

mas, lo cual permite útiles distribuciones para las áreas de exposiciones, recorridos para reconocimientos de productos y otros. La Cruz de Von Koch (también puede ser el copo de nieve de Von Koch) en sus primeros órdenes de iteración pueden aplicarse en el diseño primario de plantas de edificaciones para sistemas carcelarios y también para galerías artísticas.

Arquitectónicamente, el concepto de fractal, puede apreciarse en estilos como el gótico, donde el arco apuntado era el elemento determinante; las catedrales góticas que aún se conservan, como las de Reims, Colonia, Amiens y otras son claros ejemplos. En el Castillo del Monte, contemporáneo con las catedrales y emplazado en el sur de Italia, se manifiesta un estilo fractal basado en octógonos; se trata de una construcción militar y se relaciona la planta del mismo con la obsesión del emperador Francisco II con el número 8 (Figura 7). Siglos después fue construida la muy famosa Torre Eiffel: ¿resulta acertado trazar un paralelismo entre ella y la empaquetadura de Sierpinski[14]?

Figura 7: *Castillo del Monte (Bari - Italia)*
Imagen: http://www.absolutitalia.com/castell-del-monte

[14] La empaquetadura de Sierpinski, conocida también como pirámide de Sierpinski se puede considerar una generalización del triángulo que lleva el mismo nombre para 3 dimensiones. Se lo construye de manera análoga, partiendo de un tetraedro regular.

En India se puede apreciar el uso de patrones fractales en la construcción de templos. Aparecen los triángulos en una forma más redondeada y a diferentes escalas para la formación de decoraciones. Se pueden hallar numerosos ejemplos de este tipo de templos (Figura 8).

En referencia a la alfombra de Sierpinsky, es importante expresar la utilidad de la misma para el estudio de relaciones lleno-vacío dentro de la estructura general de las ciudades, morfologías básicas, patios de parcela y manzana, circulaciones interiores y aperturas de fachada o estructuras de máxima envergadura y mínimo peso.

Figura 8: *Arquitectura Fractal en Templo Hindú*
Imagen: http://prec.alcul.us/index.php/2011/fractals/

Existen en la arquitectura aplicaciones de fractales vinculadas a la urbanización, dentro de los proyectos más conocidos se encuentra el de Serapio Nono, arquitecto de prestigio y amante de las matemáticas, quien diseñó una amplia urbanización de viviendas siguiendo la curva de Hilbert.

Se puede hablar de una particular afinidad entre la geometría fractal y el urbanismo, estableciendo una relación entre los enfoques, analítico y propositivo, de una manera atractiva y sugerente. Las ciudades, en sus diferentes tamaños, presentan una clara autosimilitud a diferentes escalas, barrios, manzanas, casas, la cual primero fue advertida de forma intuitiva y de una manera teórica y más profunda después.

Las impresiones fractales aplicadas a la organización urbana se remonta al pasado antiguo de la humanidad y muestran como los pobladores de algunas regiones africanas se han organizado en base a la geometría fractal y no en base a la geometría euclidiana. Es así que se han encontrado aldeas organizadas de manera circular, trazando límites circulares en el territorio, con parcelas de tipo circular y también viviendas de tipo circular; se trata de organizaciones que pueden decirse gérmenes de la sociedad. El

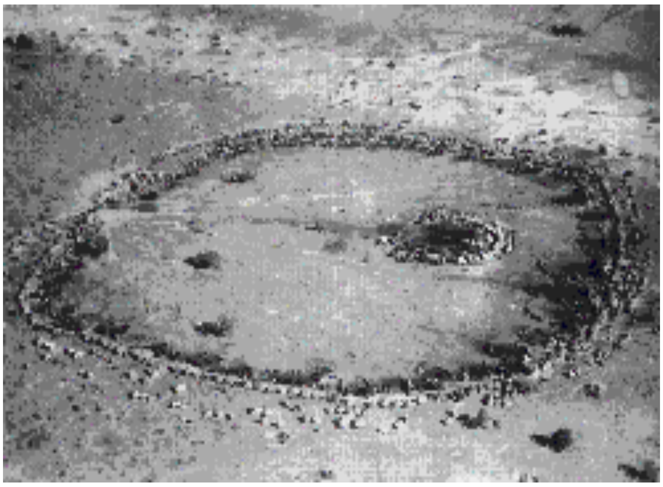


Figura 9: *Sitio arqueológico Ba-ila – Zambia.*
Imagen: http://www.theacademylb.com/?p=384

estudioso Ron Eglash[15] ha expuesto un pormenorizado trabajo sobre el sitio arqueológico conocido como Ba-ila (actual Zambia) (Figura 9) donde explica al detalle los fundamentos del asentamiento y establece un croquis del mismo con una clara base fractal (Figura 10). Además se pueden citar otros casos, como ser la forma de organización llevada adelante por los Kotoko en Logone-Birni situado en Camerún, en el cual se puede apreciar la estructura fractal, aunque en este caso no se trata de una base circular, sino rectangular. Otros ejemplos son Labbazanga, Malí y la cultura Mokoulek, en las montañas de Mandara (Camerún) en las que viven grupos étnicos conocidos como Kirdi. Todas ellas son antiguas civilizaciones situadas en África que organizaban sus sociedades a partir de formas geométricas con base fractal.

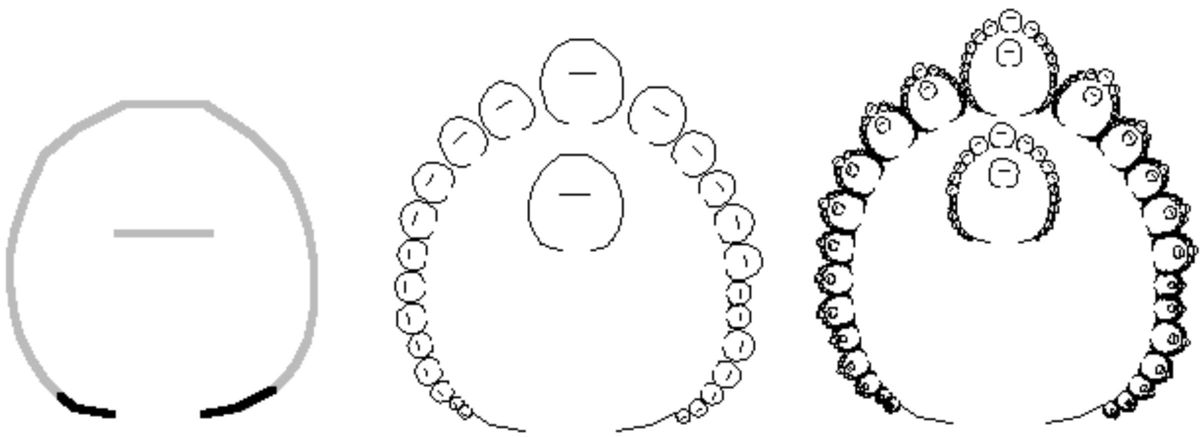


Figura 10: *Modelo de la distribución fractal de la villa Ba-ila, considerando tres iteraciones.*
Imagen: http://homepages.rpi.edu/~eglash/eglash.dir/afractal/afarch.htm

[15] Ron Eglash (dic-1958, Chestertown, MD, EE.UU.) profesor universitario reconocido por su trabajo en el campo de la etnomatemática. Sus estudios, entre otros, abarcan los patrones fractales que se encuentran en la arquitectura, religión y arte en pueblos africanos. Es autor de la publicación "Fractales africanos: Informática y Diseño Moderno Indígena" (1999). Ver: http://homepages.rpi.edu/~eglash/eglash.htm.

Figura 11: *Jardín Botánico de Barcelona.*
Imagen: http://gutierrezcabrero.dpa-etsam.com/2009/11/14/el-jardin-botanico-de-barcelona/

El Jardín Botánico de Barcelona[16] (Figura 11) asume la división fractal de la naturaleza misma, siendo el ejemplo más famoso que existe del rubro. Para su construcción el equipo de diseño ha tenido en cuenta dos consideraciones fundamentales: está relacionada con la estructuración de la vegetación, pues se debían proyectar las plantaciones siguiendo una ordenación geográfica, de manera que las plantas quedaran agrupadas según las cinco regiones mediterráneas existentes en el mundo, y en segundo lugar, se hacía necesario que el proyecto permitiera a la misma montaña ofrecer las condiciones topográficas tanto para los espacios de plantaciones como para el diseño de la red de caminos, aprovechando el relieve natural y de este modo evitar grandes movimientos de tierras.

Como resultado de estas dos premisas, se optó por adaptar una malla triangular sobre el terreno, que descansaría sobre el basamento topográfico de la montaña y a su vez delimitar los 71 espacios necesarios para poder representar las principales familias vegetales de las regiones del mundo con clima mediterráneo. La estrategia espacial utili-

[16] El Jardín Botánico de Barcelona fue proyectado por un equipo interdisciplinar formado por los arquitectos Carlos Ferrater y Josep Lluís Canosa, la arquitecta paisajista Bet Figueras, el horticultor Artur Bossy, y el biólogo Joan Pedrola.

zada para estructurar las colecciones del jardín es una red de triangulación, inspirada en Topografías Técnicas.

La geometría fractal del plan de triangulación se observa en la escala más pequeña, en la forma de zigzag, en el diseño de las facetas del sistema de ruta, en la acera, que se divide en pequeñas formas trapezoidales y en los "rotos" de los volúmenes del edificio de entrada.

En toda la superficie del jardín se establece el fuerte contraste y la tensión dinámica entre la formalidad y la materialidad de los caminos y las paredes y en la evolución de las plantaciones, salvajes y aparentemente anárquicas. Se tienen diferentes escalas de percepción:

- A escala de ciudad, pues proporciona puntos de vista abiertos sobre el Skyline de Barcelona.
- A escala del proyecto, marcada por puntos de vista general de los lugares estratégicos del jardín. A escala imaginativa, cuando se observan los diferentes phytoepisodes y la mente se traslada a Australia o los paisajes de Sudáfrica, al encontrar especies de estas lejanas zonas del mundo con clima mediterráneo.
- A escala íntima, cuando el lugar permite abstraerse del mundo exterior y perderse en la contemplación de una floración o transportarse por la percepción de un aroma.

Conclusiones.

En el avance que presenta desde su reciente aparición como concepto matemático, la geometría fractal encuentra aplicaciones en el diseño arquitectónico desde el punto de vista de las formas surgidas de los diferentes conjuntos y los alcances de cada uno (volúmenes, plantas, distribuciones, etc). Muchas de las aplicaciones se encuentran ya plasmadas en obras dispersas por todo el mundo y otras aparecen como nuevas propuestas, manifestando una tendencia en expansión cuyo crecimiento se vislumbra a diferentes escalas, aprovechando los actuales recursos técnicos que permiten los cálculos de estructuras que acompañen al diseño.

Los avances tecnológicos, popularizados en la más reciente década, han posibilitado a la arquitectura contemporánea tomar un camino de tendencia (observable claramente aún dentro de la libertad conceptual asumida y desplegada por los arquitectos actuales) en el que los proyectos se basan en modelos, funciones matemáticas y estructuras fractales, fortaleciendo los vínculos entre las disciplinas y abordando complejidades que no se habían registrado en otras épocas.

La aplicación del concepto fractal en disciplinas como arquitectura y urbanismo abarca diferentes épocas de la humanidad, desde las edificaciones medievales y aún anteriores y las organizaciones de la sociedad, hasta las más modernas construcciones como el Soho Shangdu Complex (Beijing, China), ya sean aquellos que presentan aplicaciones de fractales en su estructura, como los que la presentan en la fachada o revestimientos, poniendo de manifiesto la convivencia del arte con los fractales y el vínculo directo entre los mismos.

Bibliografía.

- Mandelbrot, Benoit (2003). *La Geometría Fractal de la Naturaleza*. Barcelona (España). Editorial Tusquets.
- Mandelbrot, Benoit (2006). *Los Objetos Fractales. Forma, Azar y Dimensión.* Barcelona (España). Editorial Tusquets.
- Sabogal, Sonia - Arenas, Gilberto (2008). *Una Introducción a la Geometría Fractal*. Bucaramanga (Colombia). Universidad Industrial de Santander.
- Spinadel, Vera W de – Perera, Jorge G. – Perera, Jorge H. (2007). *Geometría Fractal*. Buenos Aires. Ed. Nueva Librería.
- José Martínez Aroza. *Fractales.* Obtenido el 5 de diciembre de 2012, desde: http://aixa.ugr.es/fractal.html
- Freakarq. (2009). *Una gran esponja de Menger*. Obtenido el 9 de septiembre de 2011, desde: http://www.freakarq.es/esponja-menger-taipei-nl/
- Osame Kinouchi. (2009). *Fractais: Uma nova visão da natureza*. Obtenido el 22 de agosto de 2012, desde: http://www.ceticismoaberto.com/ciencia/2139/
- Bartolo Luque – Aída Agea. *Fractales en la Red.* Obtenido el 30 de octubre de 2011, desde: http://www.dmae.upm.es/cursofractales/index.html
- Ron Eglash - African fractals. Obtenido el 1 de noviembre de 2012, desde: http://homepages.rpi.edu/~eglash/eglash.htm.
- *nat. Jardí Bòtanic de Barcelona*. Presntació. Obtenido el 1 de noviembre de 2012, desde:http://w3.bcn.cat/V62/Home/V62XMLHomeLinkPl/0,4388,418159056_418871429_1,00.html